

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería Aeroespacial

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (30 a 90°)

Autor: Alberto León Cubero

Tutores: Jesús Justo Estebaranz

Juan Carlos Marín Vallejo

**Dep. de Elasticidad y Resistencia de Materiales**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Aeroespacial

**Determinación experimental de la tensión y  
deformación en rotura de una lámina  
unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción  
fuera de ejes (30 a 90°)**

Autor:

Alberto León Cubero

Tutores:

Jesús Justo Estebaranz

Juan Carlos Marín Vallejo

Dep. de Elasticidad y Resistencia de Materiales

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Carrera: Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (30 a 90°)

Autor: Alberto León Cubero

Tutores: Jesús Justo Estebaranz  
Juan Carlos Marín Vallejo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mi incomparable familia,  
Ya tí, abuelo.*





# AGRADECIMIENTOS

---

*En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres la dedicación que han tenido al brindarme una excelente educación tanto académica como personal, y por haberme animado en todo momento a estudiar aquello que más me apasiona.*

*Por supuesto quiero expresar también mi agradecimiento a mis hermanos y familia, que siempre han estado ahí.*

*A todo el equipo del LERM, sin los cuales y su ayuda en el laboratorio este proyecto no habría podido salir adelante.*

*Agradecer a mis tutores Jesús Justo y Juan Carlos Marín su apoyo durante toda la elaboración del proyecto, por estar ahí en todo momento para resolver las dudas y problemas que han ido surgiendo.*

*Dar las gracias a esos amigos que empezaron siendo compañeros de clase, pero han terminado siendo mucho más.*



# RESUMEN

---

El objetivo de este proyecto es la elaboración de una serie de probetas de fibra de carbono con matriz epoxy las cuales irán variando la orientación de la fibra con respecto a la carga de tracción aplicada posteriormente en los ensayos. Los valores considerados son: 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.

Se detallará todo el proceso de fabricación del material, desde el corte del material, hasta el curado en autoclave y corte de las probetas, para finalizar ensayándolas a tracción.

De los ensayos a tracción buscaremos obtener los datos de tensión y deformación con el fin de calcular los límites de resistencia del material, así como sus propiedades, especialmente, su módulo de elasticidad longitudinal y su módulo de elasticidad transversal.



# ABSTRACT

---

The aim of this Project is to elaborate a series of carbon fibre with epoxy matrix probes. The fibres of these probes will vary between  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  and  $90^\circ$ .

Throughout the Project, I will detail the entire process of the material manufacturing, from cutting the roll of stored material, to curing it into the autoclave and the final cutting of the probes, to finish by testing them.

From this test we will seek to obtain the stress and deformation data in order to calculate the strength limits of the material, as well as its properties, especially its longitudinal modulus of elasticity and its modulus of transverse elasticity.



# ÍNDICE

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>9</b>
<b>Resumen</b>	<b>11</b>
<b>Abstract</b>	<b>13</b>
<b>Índice</b>	<b>15</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>16</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>17</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>20</b>
1.1. <i>Antecedentes</i>	20
1.2. <i>Objetivo y estructura del proyecto</i>	21
1.3. <i>Introducción a los Materiales Compuestos</i>	21
<b>2 Ensayo off-axis</b>	<b>24</b>
2.1. <i>Introducción a los ensayos mecánicos</i>	24
2.2. <i>Determinación de <math>E_{22}</math></i>	25
2.3. <i>Determinación de <math>G_{12}</math></i>	27
2.3.1 <i>Ensayos sobre láminas con fibras orientadas (Off-Axis Tension Test)</i>	27
2.4. <i>Configuración de ensayo según ASTM D-3039</i>	28
<b>3 Fabricación de las probetas</b>	<b>30</b>
3.1. <i>Descripción del material</i>	30
3.2. <i>Condiciones de Trabajo</i>	32
3.3. <i>Proceso de fabricación.</i>	33
3.3.1 <i>Corte de material y bolsa de vacío.</i>	33
3.3.2 <i>Curado del material</i>	39
3.3.3 <i>Corte y preparación de las probetas.</i>	40
<b>4 Resultados de los ensayos.</b>	<b>46</b>
4.1. <i>Orientación de 30°.</i>	47
4.2. <i>Orientación de 45°.</i>	49
4.3. <i>Orientación de 60°</i>	52
4.4. <i>Orientación a 75°.</i>	54
4.5. <i>Orientación a 90°.</i>	57
<b>5 Discusión y Conclusiones</b>	<b>60</b>
5.1. <i>Fabricación</i>	60
5.2. <i>Ensayos.</i>	62
<b>6 Desarrollos futuros</b>	<b>67</b>
<b>Referencias</b>	<b>70</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3-1 . Medidas de las probetas.	45
Tabla 4-1 Resultados valores límites de probetas a 30°.	47
Tabla 4-2 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 30°.	48
Tabla 4-3 Resultados probetas a 45°.	49
Tabla 4-4 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 45°.	51
Tabla 4-5 Resultados probetas a 60°.	52
Tabla 4-6 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 60°.	54
Tabla 4-7 . Resultados probetas a 75°	55
Tabla 4-8 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 75°	56
Tabla 4-9 Resultados probetas a 90°	57
Tabla 4-10 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 90°.	59
Tabla 5-1 Propiedades del material en función del ángulo de fibra.	65



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1 Evolución en el uso de los materiales compuestos por Airbus	20
Figura 1-2 . Clasificación de los materiales compuestos.[1]	22
Figura 1-3 Lamina de fibra en una dirección. [1]	23
Figura 2-1 Esquema de las probetas [1]	25
Figura 2-2 Esquema del ensayo a tracción [1]	26
Figura 2-3 Probeta con fibras orientadas [1]	27
Figura 2-4 Configuración del ensayo	29
Figura 2-5 Máquina de ensayos	29
Figura 2-6 Extensómetro. [3]	29
Figura 2-7 Colocación de extensómetro	29
Figura 3-1 Características del material [3]	30
Figura 3-2 Rollo de material usado	31
Figura 3-3 Especificaciones del material usado	31
Figura 3-4 Foto detalle del material	32
Figura 3-5 Normativa AIMS05-01-001	32
Figura 3-6 Condiciones sala limpia. [6]	32
Figura 3-7 Forma del corte del material para laminado.	34
Figura 3-8 Bolsa de vacío para compactar.	35
Figura 3-9 Esquema de la bolsa de vacío [4]	36
Figura 3-10 Capa de teflón sobre base de aluminio	36
Figura 3-11 Colocación del corcho y capa superior de teflón.	37
Figura 3-12 Bolsa de vacío finalizada.	37
Figura 3-13 Foto detalle del manómetro	38
Figura 3-14 . Introducción de la bolsa de vacío en el autoclave.	38
Figura 3-15 Bolsa de vacío terminada después de salir del autoclave.	39
Figura 3-16 Esquema probeta	40
Figura 3-17 Tacos de vidrio antes y después del lijado.	41
Figura 3-18 Colocación de la fibra de vidrio antes de curar.	41
Figura 3-19 Probetas con los tacos adheridos	42
Figura 3-20 Probetas a 30°	42
Figura 3-21 Probetas a 45°	43

Figura 3-22 . Probetas a 60°	43
Figura 3-23 Probetas a 75°	44
Figura 3-24 Probetas a 90°	44
Figura 4-1 Cálculo del módulo de elasticidad tangente y secante.	46
Figura 4-2 Curvas tensión-deformación a 30°	47
Figura 4-3 Probetas a 30° después de ensayo.	48
Figura 4-4 Curvas tensión-desplazamiento a 45°	49
Figura 4-5 Probetas a 45° después de ensayo.	50
Figura 4-6 Curvas tensión-desplazamiento válidas a 45°	51
Figura 4-7 Curvas tensión-desplazamiento para 60°	52
Figura 4-8 Probetas a 60° después de ensayo	53
Figura 4-9 Curvas tensión-desplazamiento válidas a 60°.	53
Figura 4-10 Curvas tensión-desplazamiento para 75°	54
Figura 4-11 Probetas a 75° después de ensayo	55
Figura 4-12 . Curvas tensión-desplazamiento válidas a 75°	56
Figura 4-13 Curvas tensión-desplazamiento para 90°	57
Figura 4-14 Probetas a 90° despues de ensayo	58
Figura 4-15 Curvas tensión-desplazamiento válidas a 90°	58
Figura 5-1 Probeta estropeada durante el proceso de corte	61
Figura 5-2 Tensión y deformación en función de la orientación de la fibra	62
Figura 5-3 Tensión y deformación para orientaciones de 0-90°	63
Figura 5-4 Curvas tensión-deformación por ángulos de fibra.	64
Figura 5-5 Ex en función de la orientación de la fibra.	65
Figura 5-6 $G_{12}$ en función de la orientación de la fibra.	66
Figura 6-1 Curvas tensión-deformación por ángulos	67
Figura 6-2 Ratios de probetas	68
Figura 6-3 Diferente colocación del taco en la probeta.	68



# 1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es presentar los antecedentes que dieron pie a la necesidad de llevar a cabo un proyecto como este, así como dar una idea general de lo que son los materiales compuestos,

Finalmente se procederá a explicar cuales serán tanto los objetivos como la estructura del proyecto que se desarrollará a continuación.

## 1.1. Antecedentes

El uso de los Materiales Compuestos está en gran auge, como podemos ver en la Figura 1-1, debido a los notables beneficios que reporta, especialmente en la aeronáutica, gracias a unas buenas propiedades mecánicas ligadas a un reducido peso.

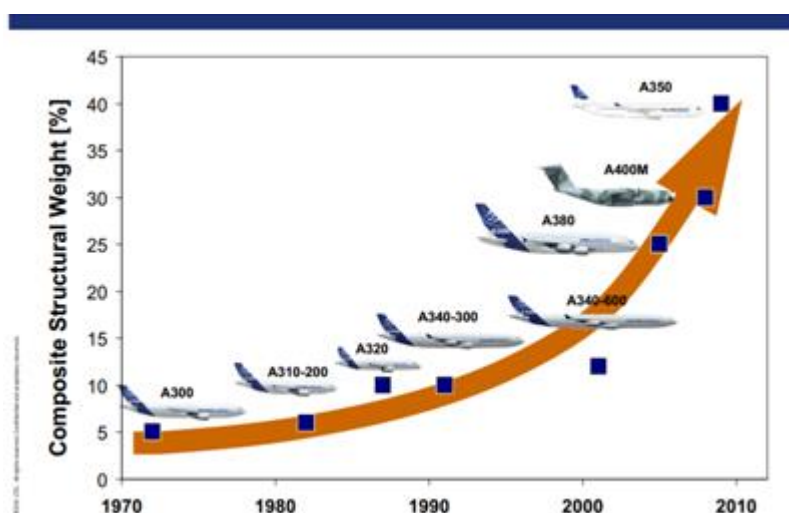


Figura 1-1 Evolución en el uso de los materiales compuestos por Airbus

A diferencia de los materiales convencionales usados, metales con un comportamiento isótropo, los materiales compuestos presentan un comportamiento anisótropo debido a su estructura, que se detallará en el siguiente capítulo. Este comportamiento, dado que conlleva diferentes propiedades mecánicas según la orientación del material, hace necesario un estudio de dichas propiedades en función de como se oriente el material con respecto a las cargas aplicadas, cargas a tracción en el caso de este trabajo.

## 1.2. Objetivo y estructura del proyecto

El objetivo de este proyecto es la fabricación y posterior ensayo de probetas de Carbono-Epoxy, de 6 capas, con variedad en la orientación de las fibras, buscando como resultado principal obtener la variación de los valores de resistencia y deformación últimas en función de la orientación de la fibra en la probeta.

Como objetivo secundario, a raíz de los resultados obtenidos, se procederá a obtener los parámetros que permitan caracterizar el material, a fin de poder usarlos en trabajos posteriores, que son: el Módulo de Elasticidad ( $E_{22}$  para la orientación de  $90^\circ$  y la  $E_x$  correspondiente a cada una de las otras orientaciones) y el Módulo de Elasticidad Tangencial o de cortadura (un  $G_{12}$  para cada una de las orientaciones, excepto para  $90^\circ$  donde no tiene sentido este parámetro).

Respecto a la estructura del proyecto, se desarrolla a continuación el proceso seguido a fin de ofrecer una visión global de este.

En primer lugar, y de manera introductoria se muestran unos conocimientos generales de los materiales compuestos.

A continuación, en el segundo capítulo, se encuentra la base teórica del tipo de ensayo realizado en este proyecto, el ensayo fuera de ejes u off-axis.

Sentada ya la base teórica, se procede con la parte práctica del proyecto, empezando por la manera de fabricación de las probetas, y continuando con el ensayo de estas, mostrando los resultados obtenidos para cada una de las orientaciones de las probetas.

Para finalizar, se analizan y comentan los resultados obtenidos, se calculan diferentes parámetros en base a ellos y se comparan con resultados anteriores.

## 1.3. Introducción a los Materiales Compuestos

Una sencilla definición para los materiales compuestos podría ser la siguiente:

*Una combinación de dos o más materiales a escala microscópica con interfases de separación entre ellos que forman con su unión un nuevo material con propiedades inalcanzables con cada uno de los componentes por separado. [1]*

Entre esas propiedades que se busca potenciar con la creación de los materiales compuestos encontramos:

- |                           |                             |
|---------------------------|-----------------------------|
| - Resistencia mecánica    | - Rigidez                   |
| - Resistencia a corrosión | - Resistencia a la abrasión |
| - Peso                    | - Vida a fatiga             |
| - Aislamiento térmico     | - Aislamiento acústico      |

Para la clasificación de los materiales compuestos atenderemos a la geometría del refuerzo que se introduce dentro de la matriz (material base), clasificación que se puede observar en la Figura 1-2.

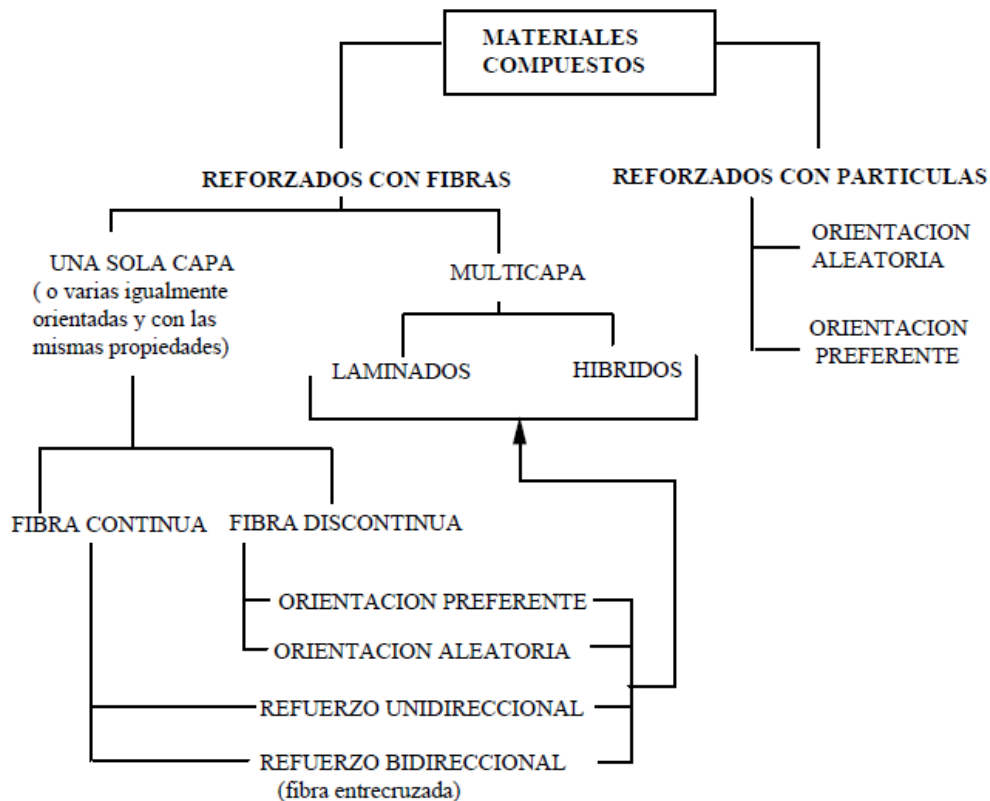


Figura 1-2 . Clasificación de los materiales compuestos.[1]

En el caso que atiende a este proyecto se hace uso de los materiales compuestos reforzados con fibra, que destacan por sus excelentes propiedades mecánicas. Estas propiedades son en teoría mayores de las que realmente presentan estos materiales, y esto es debido a la existencia de imperfecciones, por lo que una reducción de estas repercute en beneficio de las propiedades mecánicas.

Estas propiedades mecánicas son aportadas por las fibras, pero que, debido a su pequeña sección transversal, necesitan de ser embebidas en una matriz para poder tener uso en la ingeniería. Esta matriz se encarga de la unión de las fibras transmitiendo las cargas, así como protege a las fibras de agentes externos y del deterioro causado por el uso y manipulación del material.

Dentro de los materiales compuestos reforzados con fibra, como se puede observar en la Figura 1-2, se hace distinción entre dos tipos, compuestos de una sola capa y multicapa. Aunque el nombre del primer tipo haga pensar que estos materiales estén conformados por una sola capa de material, esto no es así, reciben este nombre debido que las múltiples capas que lo forman tienen las mismas propiedades y orientación. Para el caso de los compuestos multicapa se hace una distinción entre, laminados (conformado por capas con las mismas propiedades, pero diferentes orientaciones) y laminados híbridos (las diferentes capas difieren tanto en propiedades como en orientación).

Por último, encontramos, dentro de los materiales de una sola capa, el uso de dos conceptos de fibra: fibra continua y fibra discontinua. El material usado en este proyecto se engloba dentro de los materiales de fibra continua, donde el refuerzo está orientado en una única dirección. Mediante la unión de sucesivas capas de este refuerzo, Figura 1-3, se puede originar tanto el material que nos concierne, varias capas apiladas en la misma dirección, como laminados, al apilar las capas en distintas orientaciones.

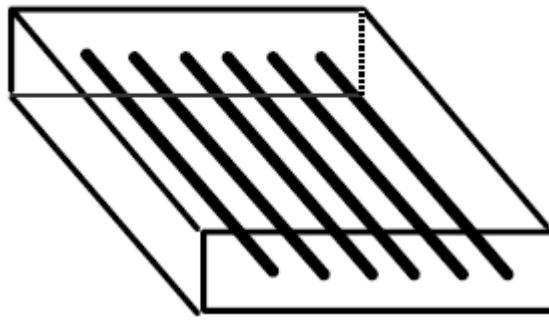


Figura 1-3 Lamina de fibra en una dirección. [1]

Con respecto a las fibras, las más usadas son las de carbono y vidrio, conteniendo fibras de carbono el material usado en este proyecto. Las fibras de carbono tienen un diámetro de 7 a 8 micrómetros y sus propiedades dependen en gran medida de la orientación de los planos de las capas de grafito que deben estar orientadas paralelamente al eje de la fibra. Son fibras frágiles que muestran una recuperación elástica del 100% cuando son sometidas a esfuerzos inferiores a los de rotura. Debido a que el hecho de que al aumentar la longitud de la fibra aumenta la probabilidad de existencia de un defecto, sufren de gran variabilidad en sus propiedades.

En lo referente a las fibras de vidrio, todas tienen como base el sílice ( $\text{SiO}_2$ ) al que se adicionan óxidos como el de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio, conformando los denominados Vidrios E, C y S. El diámetro de las fibras de vidrio varía entre 8 y 15 micrómetros, y a diferencia de las fibras de carbono son isótropas como consecuencia de la estructura tridimensional del vidrio.

Otros tipos de fibras usadas son las orgánicas (más conocidas como Kevlar), y las fibras de boro, aunque estas últimas tienen un uso más reducido.

En lo referente a las matrices, las mas usadas son las compuestas por resinas epoxy y poliéster, con gran variedad de propiedades mecánicas y químicas. Las propiedades de las resinas epoxy son en general superiores a las de las matrices de poliéster, aunque también lo es su precio. Es por ello que el uso de las resinas epoxy se reserva para aplicaciones tecnológicamente más avanzadas, mientras que las de poliéster (normalmente junto a fibra de vidrio) se usan en aplicaciones donde los requerimientos son menores. Para este proyecto, como ya se ha comentado antes, se hará uso de fibras de carbono junto a una matriz epoxy.

Dadas las buenas propiedades mecánicas de los materiales compuestos, su uso en aplicaciones ingenieriles no está tanto condicionado por estas propiedades, sino por el costo de fabricación y puesta en servicio. Solamente en aplicaciones donde el factor peso sea muy relevante (ingeniería aeroespacial), donde el precio no sea un obstáculo (aplicaciones deportivas), o el procedimiento de fabricación ya esté maduro y refinado, es donde el uso de materiales compuestos se encuentra más extendido.

Otra de las ventajas del material compuesto se encuentra a la hora de la búsqueda de un material para una aplicación determinada. Antes del nacimiento de los materiales compuestos, el ingeniero elegía el material, de todos los existentes en ese momento, que más se adecuaba a sus necesidades, ahora en cambio, es capaz de diseñar el material que más se adecue, combinando matrices, fibras y procesos de fabricación.

## 2 ENSAYO OFF-AXIS

---

**A** la hora de hacer uso de un material en una aplicación ingenieril, o en cualquier otra, es básico el conocer las propiedades de dicho material, sobre todo sus propiedades mecánicas si esa aplicación conlleva una resistencia a cargas externas.

Para la determinación de estas propiedades mecánicas se llevan a cabo los ensayos mecánicos. Hay diferentes tipos de estos ensayos para determinar cada una de esas propiedades, y para nuestro caso, vamos a centrarnos en los ensayos off-axis, que explicaremos en este capítulo.

### 2.1. Introducción a los ensayos mecánicos

Como se ha comentado en la presentación del capítulo, es necesario la realización de ensayos mecánicos con el objetivo de la caracterización del material en orden a determinar las propiedades de rigidez de este, así como determinar sus características resistentes en direcciones principales y los diversos criterios de rotura cuando se somete al material a cualquier tipo de sollicitaciones.

La caracterización mecánica de los materiales compuestos sería equivalente la de los materiales isótropos, aunque en materiales ortrótopos cobra especial importancia los diferentes componentes que conforman el material compuesto, ya que es la unión de estos lo que conforma las propiedades finales del conjunto.

Debido a que en los materiales compuestos existe un acoplamiento entre las tensiones y deformaciones normales y tangenciales, hay que tomar precauciones a la hora de establecer sus propiedades de rigidez y resistencia, aunque los ensayos para determinar esto son una continuación de los realizados en materiales isótropos.

Dada la ortropía de los materiales compuestos, a la hora de definir los criterios de resistencia, estos deben basarse en esa ortropía, y no términos de las tensiones y deformaciones principales, ya que no tienen porque coincidir con los ejes principales. Lo que se hace por tanto es comparar dos estados, uno real y otro admisible por el material, ambos referidos a la ortropía del material. El estado admisible se encuentra en función de las propiedades resistentes del material en sus propias direcciones de ortotropía. El real, por su parte, se obtiene por una rotación del tensor, siempre que las cargas aplicadas permitan una determinación fácil de las tensiones en otras dimensiones.

Con todo esto, es necesario definir cinco características del material:

- $X_t$  : Resistencia longitudinal a tracción
- $X_c$  : Resistencia longitudinal a compresión
- $Y_t$  : Resistencia transversal a tracción
- $Y_s$  : Resistencia transversal a compresión
- $S$  : Resistencia a cortadura

De estas cinco características, en este proyecto se busca obtener el valor de la resistencia transversal a



tracción,  $Y_t$ , mediante en ensayo a  $90^\circ$  de las probetas. Para el resto de orientaciones de fibra, de  $30^\circ$  a  $75^\circ$ , el parámetro buscado será el Módulo Elasticidad Tangencia,  $G_{12}$ , que se explicará más adelante.

Esta serie de constantes que caracterizan la rigidez del material se obtienen experimentalmente mediante unos ensayos adecuados. Cabe destacar que dichas constantes relacionan magnitudes sin entidad física inmediata, como son las tensiones y las deformaciones, lo que hace posible una resolución analítica que se corresponda con los ensayos, con el objetivo de obtener dichas tensiones y deformaciones a partir de los datos obtenidos de los ensayos.

Tanto para materiales isótropos como ortrótopos, que es el caso del material de estudio en este trabajo, el ensayo más extendido para obtener el valor de las constantes antes mencionadas es el ensayo de tracción. La razón de esto, para materiales isótropos es simple, se trata de un ensayo sencillo de realizar del que además es conocida su resolución analítica. Sin embargo, para el caso de materiales ortrótopos, en general no basta con el ensayo de tracción para obtener de forma fiable todas las constantes del material, aunque para las que se buscan obtener en este trabajo si es suficiente.

Se supondrá, a partir de ahora, que el comportamiento del material es lineal, lo cual es razonable pensar para fibras de carbono como con las que trabajaremos. En cualquier caso, el comportamiento ante sollicitaciones tangenciales, que es caso de los ensayos con fibras orientadas que realizaremos, es no-lineal y el valor de  $G_{12}$  será por tanto función de la carga a aplicar.

Debido a la experiencia obtenida a lo largo de los años de ensayos con materiales compuestos se ha comprobado que se pueden modelar las láminas como láminas homogéneas ortrótopas equivalentes, pudiéndose estudiar un laminado mediante la Teoría clásica de laminados. De ese modo se puede caracterizar el material como el que usaremos conociendo las propiedades mecánicas de una lámina ortrótopa.

## 2.2. Determiación de $E_{22}$

Mediante el ensayo a tracción de una probeta a  $90^\circ$  (Figura 2-1 Derecha), es posible obtener el valor de la constante  $E_{22}$  del material, que hace referencia al módulo de elasticidad según la dirección 2 (Figura 2-2).

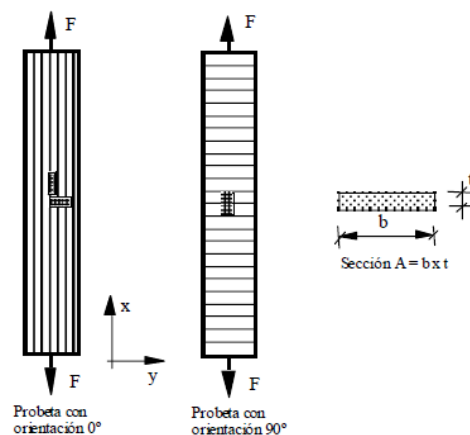


Figura 2-1 Esquema de las probetas [1]

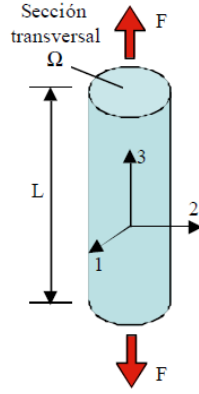


Figura 2-2 Esquema del ensayo a tracción [1]

En los materiales ortrótopos la relación tensión-deformación elástica lineal expresada en ejes principales (los ilustrados en la Figura 2-2) toma la siguiente expresión [2.1] [1].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{11}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad [2.1]$$

Pero al considerar, debido a la configuración de las probetas así como de las cargas aplicadas, que estamos ante un caso de tensión plana, la expresión [2.1] queda reducida a la [2.2] [1].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad [2.2]$$

Si se quisiese obtener los valores de  $E_{11}$  y  $\nu_{12}$ , deberíamos de usar una probeta de orientación  $0^\circ$ , en las que se debería medir los desplazamientos tanto en dirección x como en dirección y (Figura 2-1 Izquierda). Cabe destacar que la determinación de  $\nu_{12}$  se hace con la probeta de orientación  $0^\circ$  y no con la de orientación  $90^\circ$  debido a que esta última conduce, la mayoría de las veces, a obtener resultados no satisfactorios como consecuencia de la pequeña deformación transversal que se obtienen ensayando este tipo de probetas.

Volviendo al ensayo en la probeta de  $90^\circ$ , cuando esta se somete a una tracción de valor F, el tensor de tensiones solución viene dado por  $\sigma_x = F/A$ , siendo A la sección transversal de la probeta, y el resto

de componentes 0. Usando las ecuaciones constitutivas y las relaciones entre constantes en ejes arbitrarios y en ejes de isotropía particularizados para  $\theta = 90^\circ$ , llegamos a:

$$E_{22} = \sigma_x / \epsilon_x \quad [2.3]$$

Con lo que para una probeta con orientación  $90^\circ$ , el valor buscado de  $E_{22}$  queda:

$$E_{22} = \Delta F / (A \cdot \Delta \epsilon_x) \quad [2.4]$$

Para la realización de estos ensayos, aunque no estrictamente, se seguirá la normativa ASTM D-3039 que regula los ensayos para compuestos de fibra de carbono.

## 2.3. Determinación de $G_{12}$

Por último, solamente queda por determinar el cálculo de la rigidez a cortadura, y para ello, existen dos caminos a seguir para calcularla.

Un primer camino, que podremos denominar como el “camino directo”, se basa en la obtención directa de  $G_{12}$  a partir de conseguir sobre la probeta un estado de deformación tangencial pura y uniforme.

El segundo camino, y el que se seguirá en este proyecto, es el “camino indirecto”, y trata de calcular  $G_{12}$  a partir de un ensayo de tracción sobre una lámina o laminado con sus fibras orientadas en determinado ángulo con la dirección de la carga.

### 2.3.1 Ensayos sobre láminas con fibras orientadas (Off-Axis Tension Test)

Como acabamos de mencionar en el punto anterior, para la evaluación de  $G_{12}$  seguiremos el camino indirecto basado en someter a una probeta, cuyas fibras estén orientadas un respectivo ángulo (entre  $30^\circ$  y  $90^\circ$  en este caso) con la carga aplicada.

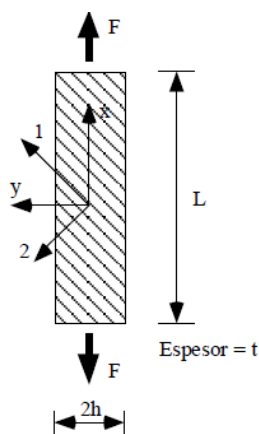


Figura 2-3 Probeta con fibras orientadas [1]

Mediante un extensómetro será posible obtener el valor de  $\epsilon_x$  y a partir de este, y del valor de la carga aplicada, podremos obtener  $E_x$ , mediante el razonamiento seguido en el apartado 2.2, más concretamente con las expresiones [2.3] y [2.4], teniendo en cuenta que  $A = 2ht$  es el área de la sección transversal de la probeta.

Para el cálculo de  $G_{12}$ , será necesario también conocer los valores de  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  y  $\nu_{12}$ , de los cuales  $E_{11}$  y  $\nu_{12}$  nos han sido dados gracias a que fueron obtenidos gracias a otra serie de ensayos que englobaban unas orientaciones de fibra de  $0^\circ$  a  $30^\circ$ .  $E_{22}$  lo podremos obtener mediante nuestro ensayo a las probetas con  $90^\circ$  de orientación de fibra.

Una vez conocidos todos estos valores, el valor de  $G_{12}$  podrá ser calculado a través de la expresión [2.5].

$$G_{12} = \frac{\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)}{\frac{1}{E_{11}}\cos^4(\theta) - \frac{1}{E_x} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}}\cos^2(\theta)\sin^2(\theta) + \frac{1}{E_{22}}\sin^4(\theta)} \quad [2.5]$$

## 2.4. Configuración de ensayo según ASTM D-3039

Basándonos en la norma ASTM D-3039 [5] para la realización de los ensayos, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Alineamiento de la carga. Con objeto de evitar que la carga aplicada sobre la probeta provoque flexión en esta, la probeta se colocará totalmente perpendicular a la mordaza de la prensa que ejercerá la carga, comprobado con una escuadra la correcta alineación.
- Condiciones standard. La temperatura debe ser lo más cercana a  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  con una humedad relativa de  $50 \pm 10\%$ .
- La velocidad de carga se establecerá en  $0.5\text{mm/min}$ .
- Toma de datos. Se harán series de entre 8 y 9 probetas para cada una de las orientaciones para obtener las constantes mediante la aplicación de las ecuaciones [2.4]. Para cada una de las series se determinarán las siguientes magnitudes:

- Valor medio  $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$

- Desviación típica  $s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2}}{n-1}$  [2.5]

- Coeficiente de variación  $\eta = \frac{100s}{\bar{X}}$

donde  $X$  es el valor considerado y  $n$  el número de muestras.

Para los ensayos, usaremos una máquina universal de ensayos INSTRON 4482 (Figura 2-5), con unas mordazas con 0-6mm de apertura que son las que mejor se adaptan a nuestras probetas.



Figura 2-4 Configuración del ensayo



Figura 2-5 Máquina de ensayos

En la Figura 2-6 se puede observar la configuración del ensayo, después de la rotura de una de las probetas. En la Figura 2-6 falta el extensómetro que acaba de ser retirado y mediante el cual obtendremos la medida del desplazamiento. El extensómetro usado es el modelo 2630-112, idéntico al de la Figura 2-7, y se procede a su colocación tal como se observa en la Figura 2-5.



Figura 2-6 Extensómetro. [3]



Figura 2-7 Colocación de extensómetro

## 3 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

En este capítulo se hará una descripción del proceso de fabricación de las probetas usadas en los ensayos, empezando por la descripción del material y pasando a desarrollar cada uno de los procesos y herramientas involucrados.

### 3.1. Descripción del material

El material usado en este proyecto se engloba dentro de las matrices epóxicas. En este caso se trata del Hexply AS4/8552 RC34 AW194, donde la nomenclatura hace referencia a lo siguiente:

AS4: Denominación de la fibra.

8552: Denominación de la resina.

RC34: Contenido de resina.

AW194: Areal Weight, cantidad de fibra por unidad de área.

En la Figura 3-1 podemos ver las características físicas del material que se encuentran en la página web del fabricante:

#### *Physical Properties*

	Units	AS4
Fibre Density	g/cm <sup>3</sup> (lb/in <sup>3</sup> )	1.79 (0.065)
Filament count/tow		12K
Resin density	g/cm <sup>3</sup> (lb/in <sup>3</sup> )	1.30 (0.047)
Nominal Cured Ply Thickness 8552 /35%/134	mm (inch)	0.130 (0.0051)
Nominal Fibre Volume	%	57.42
Nominal Laminate Density	g/cm <sup>3</sup> (lb/in <sup>3</sup> )	1.58 (0.057)

Figura 3-1 Características del material [3]

Y en la Figura 3-2 y Figura 3-3 tenemos imágenes del rollo de material usado tal y como es almacenado, dentro de un congelador a -18°C y de las especificaciones de este.



Figura 3-2 Rollo de material usado



Figura 3-3 Especificaciones del material usado

En la figura 3-4 tenemos un plano detalle del material, donde se ve perfectamente la orientación horizontal de las fibras.



Figura 3-4 Foto detalle del material

Fabricado por Hexcel Corporation, se engloba dentro de la normativa AIMS05-01-001 (Figura 3-5) según las especificaciones de Airbus.

AIMS05-01-001

Airbus Material Specification - Carbon fibre reinforced epoxy prepreg - UD tape/180°C curing class-Standard modulus fiber-Structural material. – Material Specification

Figura 3-5 Normativa AIMS05-01-001

### 3.2. Condiciones de Trabajo

Toda la fabricación, así como los ensayos, van a ser realizados en el laboratorio del LERM ubicado en los laboratorios de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Este laboratorio cuenta con una sala limpia donde se procederá al corte del material y al proceso de apilado, con el fin de evitar la contaminación del material con partículas que pudiesen estar en el ambiente y pudiesen reducir las propiedades de las probetas resultantes. Las condiciones de la sala limpia deben estar dentro de unas condiciones límites (Figura 3-6).

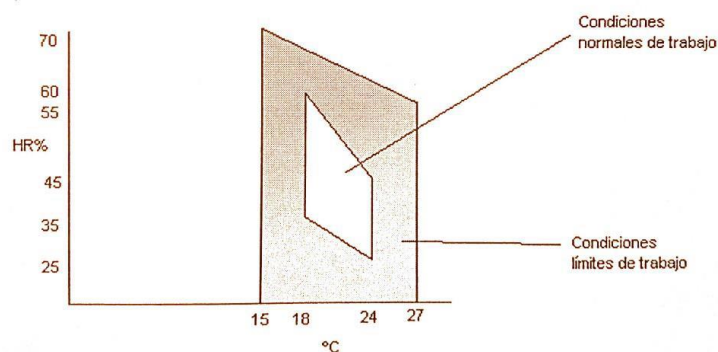


Figura 3-6 Condiciones sala limpia. [6]



En resumen, durante la fabricación debemos garantizar una serie de condiciones dentro de la sala limpia:

- Tanto la presión como la temperatura debe estar en todo momento dentro de la región de condiciones normales de trabajo. Para ello la sala cuenta con un dispositivo de aire acondicionado y un humidificador de aire que regula estas condiciones.
- Debe haber en todo momento una sobrepresión de 1 mm de  $H_2O$  dentro de la sala con el fin de evitar que el aire exterior que pueda contener partículas contaminantes entre dentro de la sala.
- Dentro de la sala limpia se utilizarán en todo momento batas, guantes y protector de calzado para evitar la contaminación del material.
- Debe haber un control continuo de las partículas en suspensión, para evitar que la concentración de partículas con un tamaño superior a  $5\mu m$  no sea superior a 50 partículas por litro de aire.

### 3.3. Proceso de fabricación.

La descripción del proceso seguido a la hora de elaborar las probetas, vamos a dividirlo en varios subapartados: Corte del material y preparación de la bolsa de vacío, curado del material y por último el corte de las probetas.

#### 3.3.1 Corte de material y bolsa de vacío.

Una vez establecidas las condiciones en las que se va a trabajar para la elaboración de las probetas, vamos a pasar a realizar la explicación en detalle de cada uno de los procesos a seguir.

A continuación, se expondrá un pequeño resumen de los elementos usados durante la fabricación, a fin de tener una pequeña descripción de ellos antes de proceder con la explicación del proceso de fabricación:

- Elementos de corte. El corte del material se realizará con un cúter, con la ayuda de un juego de regla, escuadra y cartabón con el fin de obtener unos cortes precisos y limpios. Se requerirá además de unas tijeras para cortar los materiales (lámina desmoldeante y el Airwave) necesarios para conformar la bolsa de vacío donde será curado el material dentro del autoclave.
- Bolsa de vacío. Este elemento es necesario para el correcto curado del material, que debe ser realizado en vacío. La bolsa de vacío será detallada más adelante en este capítulo.
- Autoclave [7]. Se trata de un horno con un sistema que controla tanto la presión como la temperatura en su interior. Sus principales componentes son:
  - o Cámara presurizada. Es el cuerpo del autoclave, y principalmente con forma de cilindro a fin de reducir los esfuerzos provocados por las altas presiones que se alcanzan en su interior.

- Dispositivos de calentamiento. Encargados de alcanzar las distintas temperaturas de curado para cada tipo de material introducido y para cada tramo del ciclo de curado.
- Sistema de aplicación de vacío. Se trata de una parte muy importante del autoclave ya que el control de la presión tanto dentro de la cámara, como dentro de la bolsa de vacío es fundamental para el correcto curado del material.
- Sistema de control de los parámetros de curado. Básicamente es el ordenador que se encarga de controlar el autoclave y hacer que en todo el proceso las condiciones de presión y temperatura sean las adecuadas.
- Soporte para los moldes dentro de la cámara.

El primer paso para el proceso de fabricación es el corte del material a partir del rollo almacenado en frío para preservar las propiedades. El ancho de este rollo de material es de 15cm, para una orientación de la fibra de 0°. Nuestro objetivo es crear probetas de 30 a 90°, y como queremos un número mínimo de estas, buscamos crear placas de 15x20 cm de las que cortaremos las probetas con unas medidas de 1.5x20cm.

Si la orientación de las fibras fuese de 0° en nuestras probetas, el proceso sería muy sencillo ya que solo deberíamos de cortar 6 piezas de material de 15x20 cm y apilarlas. Sin embargo, al tener una orientación grande (mayor de 30°), si queremos obtener una plancha de material de 15x20 cm deberemos cortar una serie de formas geométricas a fin de unir las para obtener la plancha con la orientación de la fibra deseada.

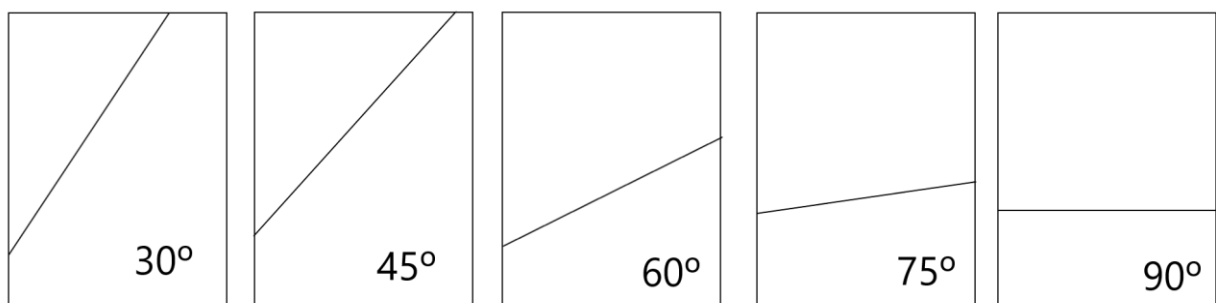


Figura 3-7 Forma del corte del material para laminado.

En la Figura 3.7 se pueden apreciar los diferentes cortes que han sido necesario realizar para poder obtener unas probetas de las medidas deseadas. Las zonas de unión, que son paralelas a la dirección de la fibra, durante el curado del material en el autoclave quedaran totalmente eliminadas, debido que la matriz se funde y vuelve a solidificarse rellenando dicha unión.

Una vez tenemos cortadas todas las piezas, podemos proceder a realizar el apilado de estas, teniendo siempre en cuenta de hay que retirar la capa protectora antes de unir dos capas. Cada vez que apilemos una capa sobre otra usaremos una espátula para afianzar la unión entre las capas y que queden correctamente pegadas sin aire entre ellas. Cuando tengamos 3 capas apiladas, introducimos la plancha

en la bolsa de vacío (Figura 3-8) con el fin de conseguir un compactado más fuerte. Esta bolsa de vacío está unida a un compresor que puede conseguir una vacío de aproximadamente 0.5 bares.



Figura 3-8 Bolsa de vacío para compactar.

Una vez tenemos compactado todo el material, llega la hora de preparar la bolsa de vacío en la que introduciremos el material para su curado dentro del autoclave. Antes de entrar en detalle en el proceso de formación de la bolsa de vacío, vamos a hacer una descripción de los materiales a usar:

- Base de aluminio. Es la base donde se apilarán las diferentes capas que usaremos para la bolsa.
- Cromato. La cinta de cromato es la encargada de sellar la bolsa en sus bordes para evitar la entrada de aire y obtener así el vacío dentro de esta.
- Teflón. Se trata del material antiadherente que usaremos para evitar que durante el curado el material se adhiera al resto de capas de la bolsa.
- Corcho. El corcho lo usaremos en forma de tiras que rodearan a las diferentes planchas de material compuesto para evitar que, durante el curado, cuando la matriz derrita, este fluya y pase de un laminado a otro.
- Airwave. Tejido muy poroso que se coloca en la parte superior y cuyo fin es la correcta distribución del vacío en toda la bolsa.
- Tomas de vacío. Dispositivos a los que se conectarán los mangüitos del autoclave para hacer el vacío dentro de la bolsa.
- Capa externa de plástico. Capa de plástico resistente que se usa para cerrar la bolsa, mediante su unión a la base de aluminio por el cromato.

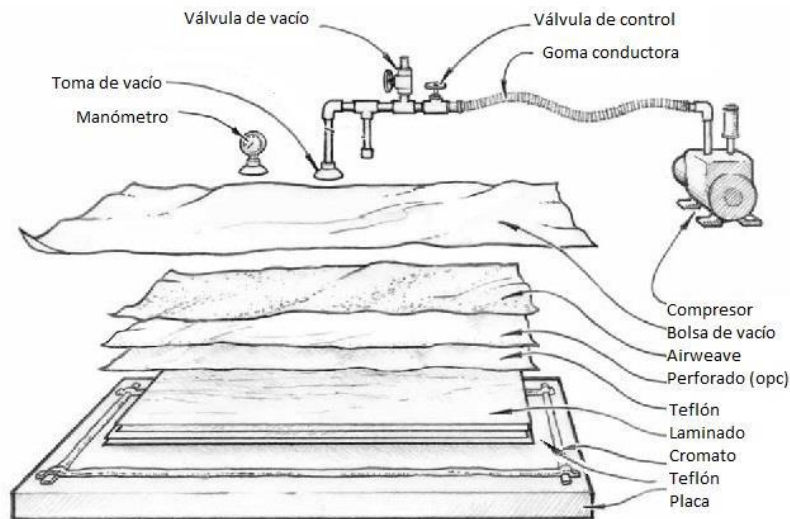


Figura 3-9 Esquema de la bolsa de vacío [4]

Partiendo de la base de aluminio, el primero paso es colocar sobre esta una capa de teflón, teniendo cuidado de que no llegue a cubrir hasta el borde de la placa, debido a que en dicho borde será colocado más tarde el cromato (Figura 3-10 )



Figura 3-10 Capa de teflón sobre base de aluminio

Una vez colocado el teflón, se procede a la colocación de las planchas del material compuesto, además de la colocación de las tiras de corcho para evitar que la resina de la matriz fluya entre ellas. En la figura 3-11 se puede observar el resultado.

En la Figura 3-11 puede observarse además una segunda capa de teflón que se coloca encima de las planchas de material compuesto para una fácil separación de estas después del curado.

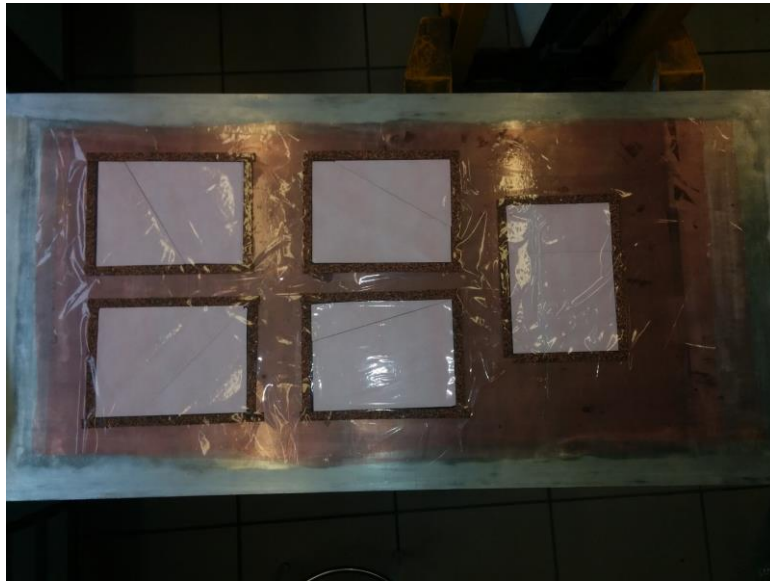


Figura 3-11 Colocación del corcho y capa superior de teflón.

Ya colocadas las tiras de corcho y las capas de teflón, se procede a la colocación de la capa de Airwave o tejido aireador, que como ya se comentó al principio de este apartado, sirve para hacer que el vacío que se induce en el interior de la bolsa sea lo más homogéneo posible.

Sobre esta capa de Airwave se colocan las tomas de las válvulas de vacío y se procede al cierre de la bolsa mediante una capa de plástico resistente, sellándolo a la base de aluminio mediante la cinta de cromato que se ha colocado previamente en los bordes. En la figura 3-12 se puede ver el resultado final de la bolsa de vacío.



Figura 3-12 Bolsa de vacío finalizada.

Para el correcto sellado de la bolsa, haremos uso de una espátula, puede ser la misma que usamos previamente para el compactado del material compuesto, con la que haremos presión sobre el cromato para asegurar una correcta fijación plástico-cromato-aluminio. Para asegurar que el sellado es el adecuado, nos ayudamos de un manómetro que colocaremos en una de las válvulas de vacío y conectado un compresor a la segunda válvula haremos el vacío en la bolsa. Mediremos cual es la presión en ese momento, y pasado un tiempo, una media hora es suficiente, comprobaremos si ha variado el valor del barómetro (Figura 3-13 ).



Figura 3-13 Foto detalle del manómetro

Si la presión se ha mantenido constante, podemos proceder a introducir la bolsa de vacío en el autoclave (Figura 3-14). Si la presión ha aumentado, significa que el sellado de la bolsa no está realizado correctamente, por lo que tendremos que repasar la fijación del cromado.

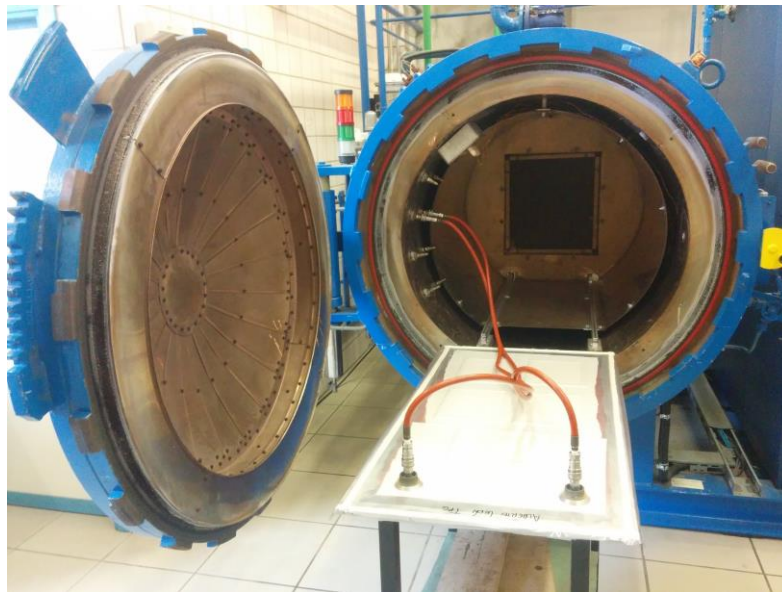


Figura 3-14 . Introducción de la bolsa de vacío en el autoclave.



### 3.3.2 Curado del material

Como ya se ha comentado, para el curado del material, es necesario el uso de un autoclave, donde se controlen tanto la presión como la temperatura durante todo el proceso. En la figura 3-14 se puede observar una imagen del autoclave usado, pudiéndose observar tanto su forma cilíndrica para reducir los efectos de la presión, como las mangueras que se conectan a la bolsa de vacío para asegurar el vacío dentro de esta.

Para el ciclo de curado, se toman los datos de la hoja técnica del material [8], quedándonos un ciclo tal que:

- Presión del autoclave: de 3.5 a 7.2 bares
- Ratio de calentamiento: de 0.2 a 3.5°C/min, escogiéndose este último valor con el fin de acelerar el proceso.
- Tiempo de curado y temperatura: de las varias opciones que se ofrecen, se opta por un tiempo de curado de 120 min a una temperatura de  $185\pm 5^\circ\text{C}$ .
- Ratio de enfriamiento. Se escoge igual que el ratio de calentamiento, es decir, 3.5°C/min.

Una vez finalizado el ciclo de curado, se extrae la bolsa del autoclave, quedando como se puede ver en la Figura 3-15, en la cual ya se han retirado las tomas de vacío. Podemos asegurar que dicha bolsa ya ha pasado por el proceso de curado únicamente observando el color del cromato, que ha pasado de blanco a marrón debido a la temperatura.



Figura 3-15 Bolsa de vacío terminada después de salir del autoclave.

### 3.3.3 Corte y preparación de las probetas.

Una vez tenemos el material compuesto curado, podemos proceder a la elaboración de las probetas, partiendo de cada una de los laminados.

El primero paso es eliminar el corcho puesto en los bordes de los laminados que evitaba que la resina fluyera de una plancha de material a otra. Para ello se hace uso de una radial con filo de diamante de la que disponemos en el laboratorio. A este proceso se le denomina “resanar los bordes”.

El objetivo es crear unas probetas siguiendo el esquema de la Figura 3-16 , con unas medidas de 200 mm de largo por 15mm de ancho. Por tanto, teóricamente deberemos obtener 10 probetas de cada probeta, pero debido a la reducción de material debido al resanamiento de los bordes, como durante el proceso de corte de cada una de las probetas, y teniendo en cuenta que puede haber fallos durante el corte o la preparación de las probetas, finalmente obtendremos entre 7 y 9 probetas por plancha.



Figura 3-16 Esquema probeta

Como se observa en la figura 3-16 , la probeta cuenta con dos trozos de otro material adherido a los extremos. Este material es fibra de vidrio, y se coloca ahí para que, durante el ensayo de tracción, las mordazas agarren en dicha zona, y la probeta rompa por la zona central, lejos de los concentradores de tensión que suponen las mordazas, obteniendo así unos mejores resultados.

Para la preparación de estos tacos de fibra de vidrio, partimos de unas grandes planchas sobre las que cortaremos los tamaños que necesitaremos. Pero antes de esto, debemos hacer un pulido de esta fibra de vidrio con una lija, aunque únicamente de la cara que irá adherida al material. Esto se hace para facilitar dicha adherencia, ya que el adhesivo que usaremos es más efectivo si la superficie es lisa.

Una vez pulida la plancha procederemos al corte de esta. Para hacer más fácil el proceso, primero pegaremos la fibra de vidrio a la plancha de material compuesto, para más tarde cortar las probetas, ya si primero cortamos las probetas y luego pegamos individualmente la fibra de vidrio, obtendremos el mismo resultado, pero con proceso mucho más lento y tedioso.

Para cerciorarnos de que el lijado ha sido el correcto tenemos dos vías:

- La cara pulida debe tener un acabado mate que no refleje la luz.
- No debe notarse rugoso al tacto, ya que si la rugosidad es muy grande (apreciable al tacto) la fijación sobre el material compuesto no sería la ideal.



En la Figura 3-17 se pueden ver las diferencias antes y después del lijado.



Figura 3-17 Tacos de vidrio antes y después del lijado.

Un detalle más a comentar antes de proceder a la unión mediante adhesivo es que debemos lijar, además de la fibra de vidrio, el material compuesto donde irá dicha fibra de vidrio adherida.

Para la fijación de los tacos de vidrio se hará uso del adhesivo Z-15429. Este adhesivo se tiene en forma de una lamina de la que cortamos los trozos de las medidas adecuadas, que se coloca entre el material compuesto y el taco de fibra de vidrio. Dado que la longitud de las probetas es de 20 cm, usaremos unos tacos de longitud igual a 5 cm, con lo que en total nos quedará una longitud efectiva de la probeta de 10 cm, que es totalmente adecuada para nuestro caso.

Para evitar que el taco de mueva antes de que este correctamente adherido, hacemos uso de cinta adhesiva, como vemos en la Figura 3-18.

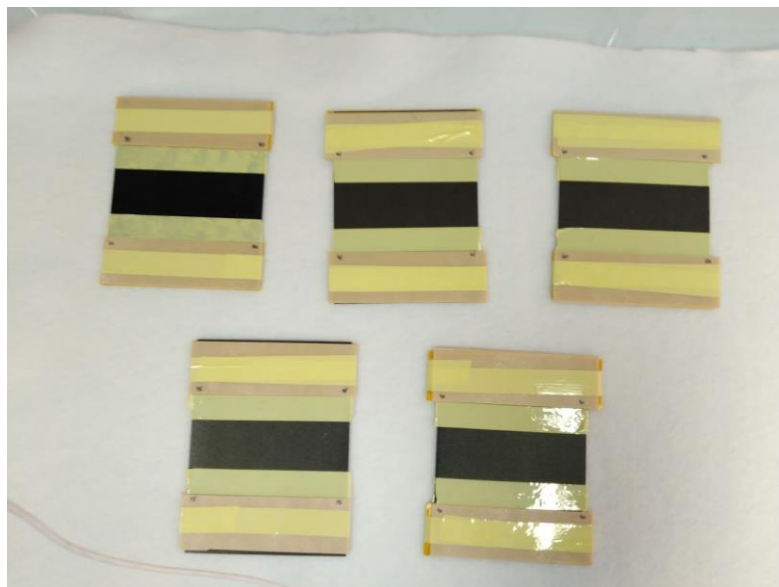


Figura 3-18 Colocación de la fibra de vidrio antes de curar.

Para que el adhesivo haga efecto, debemos introducir las probetas en el autoclave a 120° durante 1 hora.

En la Figura 3-19 se observa el resultado después del paso por el autoclave y de retirar la cinta adhesiva.

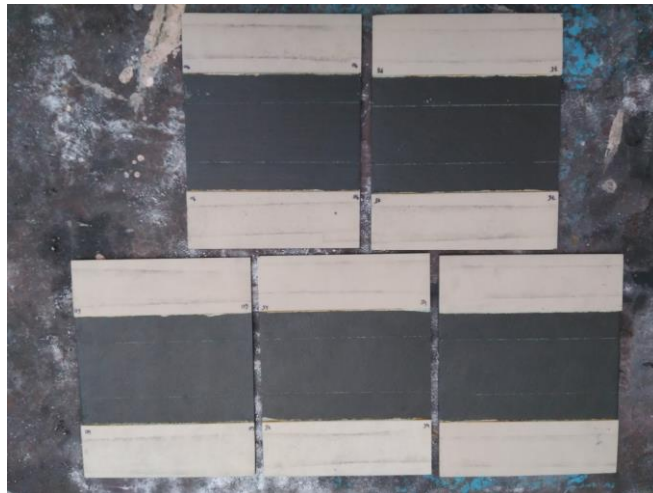


Figura 3-19 Probetas con los tacos adheridos

Ya solo queda proceder al corte de las diferentes probetas con la radial con hoja de filo de diamante, con las medidas antes comentadas, es decir, un ancho de 15mm.

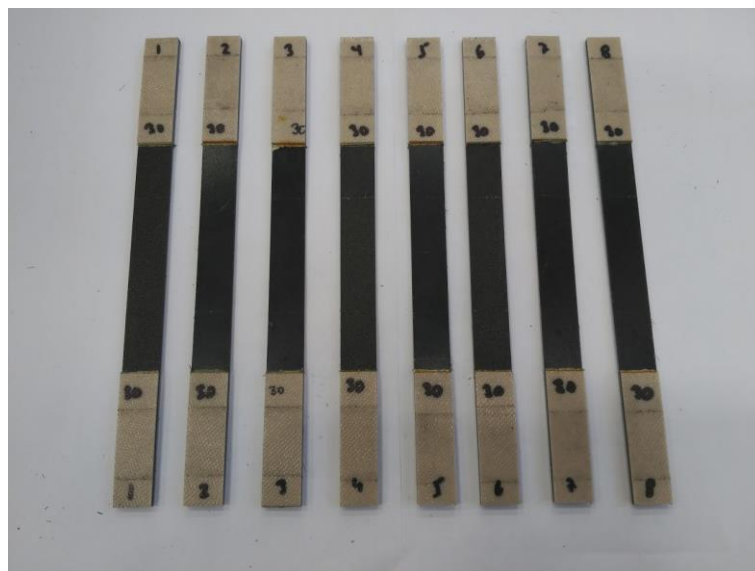


Figura 3-20 Probetas a 30°



Figura 3-21 Probetas a 45°



Figura 3-22 . Probetas a 60°

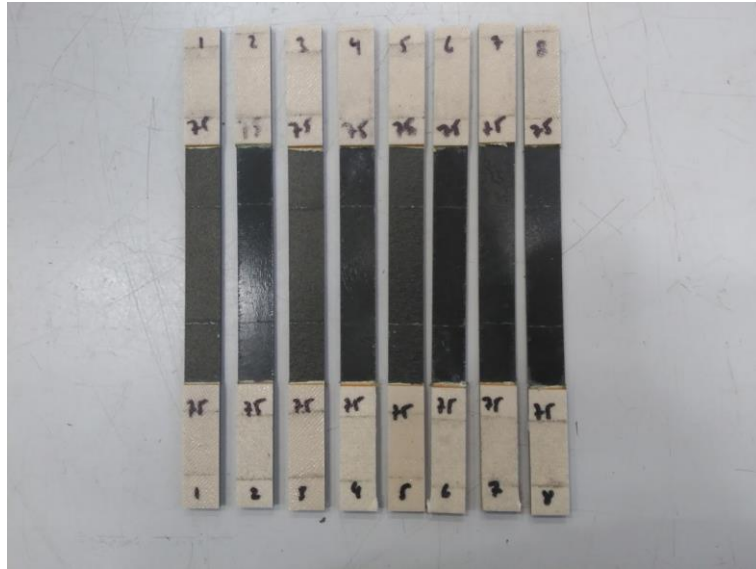


Figura 3-23 Probetas a 75°

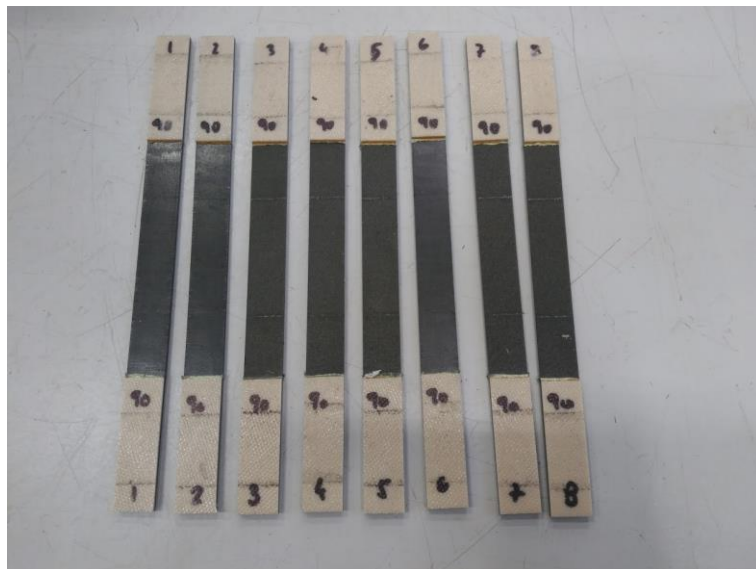


Figura 3-24 Probetas a 90°

En la Tabla 3-1, se tienen las medidas de cada una de las probetas. La tabla reúne los datos de ancho y espesor de las probetas, a lo que hay que añadir el dato de que todas las probetas tienen una longitud de 20cm.

	30º		45º		60º		75º		90º	
Nº Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	15	1,19	14,85	1,18	15,03	1,19	14,63	1,18	14,68	1,17
2	14,75	1,18	14,35	1,17	15,85	1,18	14,78	1,18	15,04	1,18
3	14,75	1,19	14,79	1,18	14,73	1,19	14,9	1,17	14,84	1,18
4	14,85	1,18	14,38	1,18	14,8	1,19	14,75	1,18	14,74	1,17
5	14,95	1,2	14,6	1,17	14,38	1,19	14,56	1,18	14,85	1,17
6	15,2	1,17	14,9	1,18	14,68	1,18	14,05	1,17	14,96	1,18
7	15,05	1,18	14,36	1,18	14,65	1,19	15,01	1,17	14,75	1,19
8	15,1	1,19			14,72	1,19	14,69	1,17	14,65	1,17
9	14,6	1,18			14,61	1,19				

Tabla 3-1 . Medidas de las probetas.

Antes de pasar a describir el proceso de ensayo y los resultados de estos, hay que hacer un apunte en cuanto a seguridad dentro del laboratorio. Durante el proceso de corte, y especialmente en el lijado, se emiten al ambiente muchas partículas de material compuesto y fibra de vidrio, que, si se introducen dentro de nuestro sistema respiratorio, pueden ser nocivas. Para ello, en todo momento que estemos en el laboratorio usaremos una bata de trabajo, guantes y gafas protectoras, y siempre que estemos cortando y puliendo, usaremos también mascarilla.

## 4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

**E**n este apartado se recogen todos los datos obtenidos a partir de los ensayos de tracción de cada una de las probetas. Como se ha comentado en apartados anteriores, para cada una de las orientaciones, tenemos muestras de entre 7 y 9 probetas. Sin embargo, una vez ensayadas todas las probetas, no todos los resultados son válidos, bien porque se ha producido una rotura temprana por defecto en la probeta, o bien porque la rotura se produce dentro del tacón de fibra de vidrio, lo que no aporta unos resultados fiables. A continuación, se detallarán los resultados probeta a probeta para cada una de las orientaciones de fibra.

Los resultados obtenidos los separaremos en dos series de datos:

- Una primera tabla que contiene los datos necesarios para obtener la tensión y deformación últimas para cada una de las probetas, así como dichos valores. Se obtienen también los valores medios, así como la desviación típica.
- Una segunda tabla donde se calculan los valores de Módulo de elasticidad y de resistencia a cortadura, tanto los calculados con los valores últimos de tensión y deformación a los que nos referiremos con el sufijo “sec”, como los calculados tomando únicamente como datos el primer tramo lineal de valores.

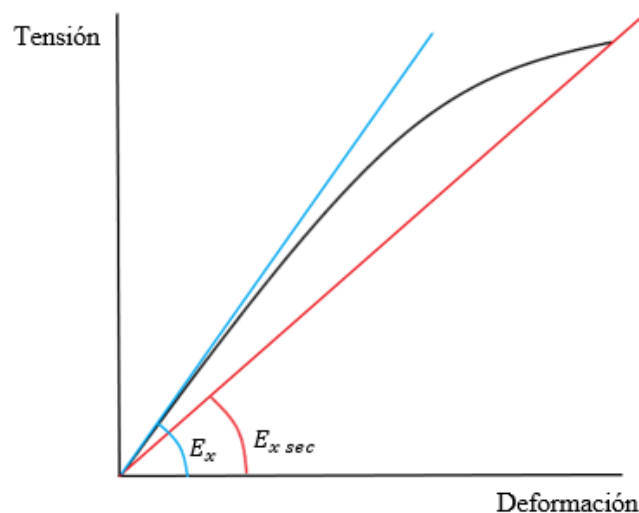


Figura 4-1 Cálculo del módulo de elasticidad tangente y secante.

## 4.1. Orientación de 30°.

En la Figura 4-2, se tienen todas las curvas tensión-deformación para las probetas de 30°, así como los datos para estas probetas en la Tabla 4-1.

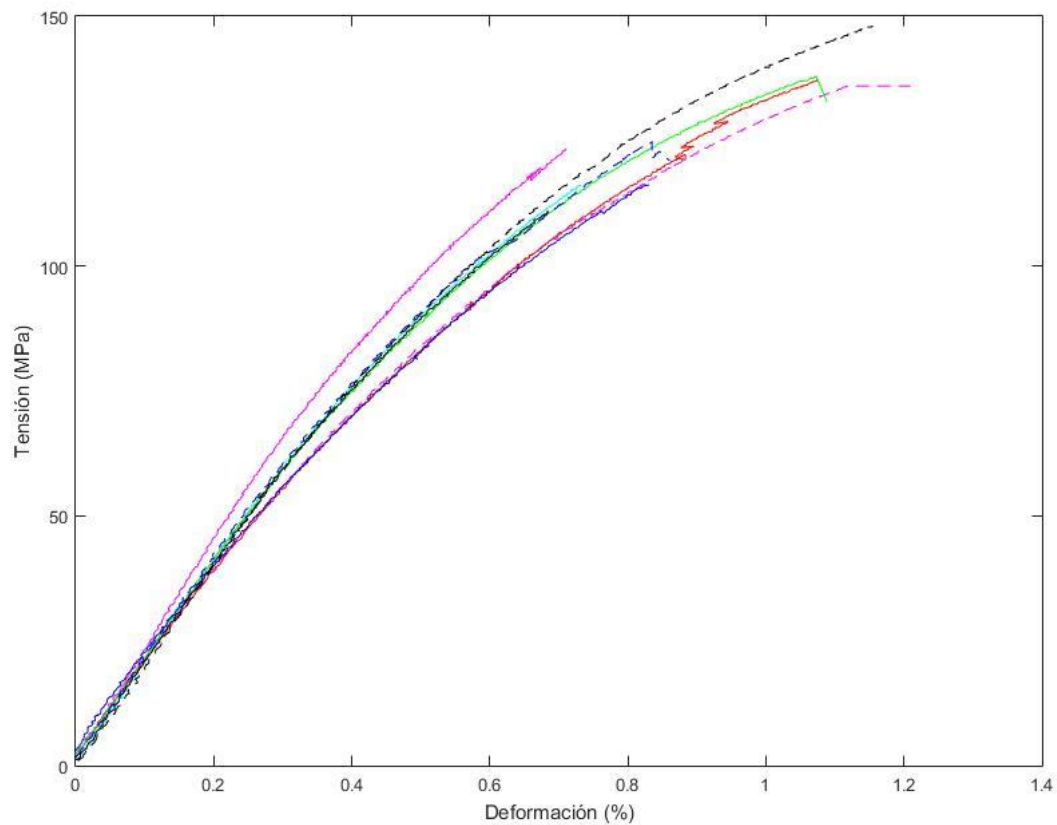


Figura 4-2 Curvas tensión-deformación a 30°

Nº Probeta	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga última (N)	Resistencia a tracción (Mpa)	desplazamiento max (mm)	Deformación max (%)
1	17,85	2428,00	136,02	0,56	1,12
2	17,41	2149,40	123,49	0,36	0,71
3	17,55	2038,50	116,14	0,37	0,73
4	17,52	2404,40	137,21	0,54	1,07
5	17,94	2478,00	138,13	0,54	1,07
6	17,78	2067,00	116,23	0,42	0,83
7	17,76	2220,00	125,01	0,42	0,83
8	17,97	1993,40	110,94	0,34	0,68
9	17,23	2551,60	148,11	0,58	1,15
Media	17,67	2258,92	127,92	0,46	0,91
Desviación Típica	0,25	210,01	12,53	0,10	0,19

Tabla 4-1 Resultados valores límites de probetas a 30°.

En la figura 4-3 se pueden observar como han roto las probetas. En cuanto a las roturas pueden ocurrir dos casos:

- El caso ideal que rompa por la zona central, lo que significa una rotura que no se ha visto afectada por los tacos y cuyos resultados son enteramente debidos a la resistencia del material.
- Rotura en uno de los extremos. Estas roturas pueden verse afectadas por los tacos, lo que provoca roturas prematuras en las probetas. Puede ser también que los resultados obtenidos en este tipo de roturas sean totalmente válidos.

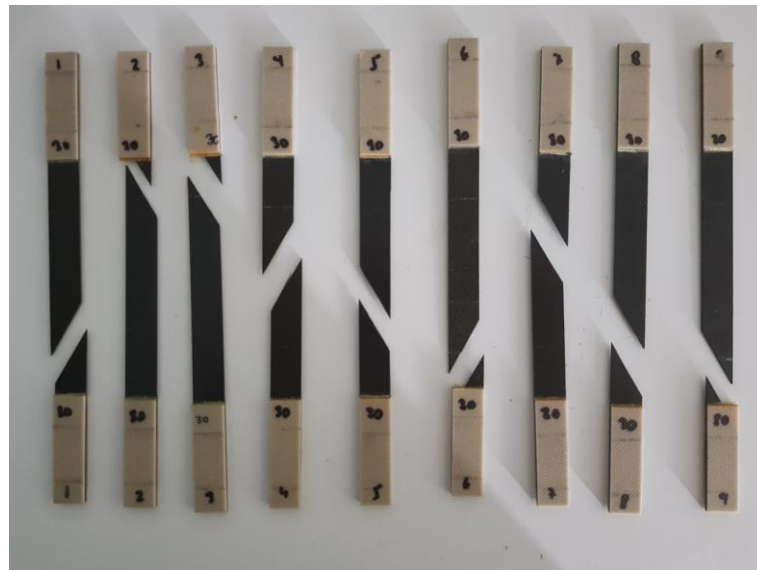


Figura 4-3 Probetas a 30° después de ensayo.

En la vista a estos resultados, podemos decir que todos los ensayos entran dentro del rango de válidos. Se podrían descartar los valores máximo y mínimo, ya que tienen una dispersión algo grande, sin embargo, la media de los resultados incluyendo y excluyendo esos resultados no varía significativamente.

Para las probetas válidas, vamos a tomar los valores del primer tramo del ensayo para la obtención del  $E_x$  y  $G_{12}$  (Tabla 4-2), punto donde empiezan a dispersarse las curvas.

Nº Probeta	$E_x$ (MPa)	$G_{12}$ (MPa)	$E_{xsec}$ (MPa)	$G_{12sec}$ (MPa)
1	19301,90	4629,55	12164,41	2644,59
2	18882,50	4501,65	17359,19	4049,79
3	19354,50	4645,70	15870,09	3626,41
4	17818,18	4183,89	12795,03	2804,89
5	18900,00	4506,95	12880,18	2826,73
6	19840,00	4795,94	13989,90	3116,04
7	19427,80	4668,25	14974,49	3380,05
8	19495,50	4689,12	16270,97	3738,67
9	18740,00	4458,54	12829,85	2813,81
Media	19084,49	4564,40	14348,23	3222,33
Desviación Típica	588,94	178,20	1845,32	497,77

Tabla 4-2 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 30°.



## 4.2. Orientación de 45°.

Pasaremos ahora a estudiar los resultados de los ensayos para orientación de 45°. Primeramente se muestran los resultados para todas las probetas.

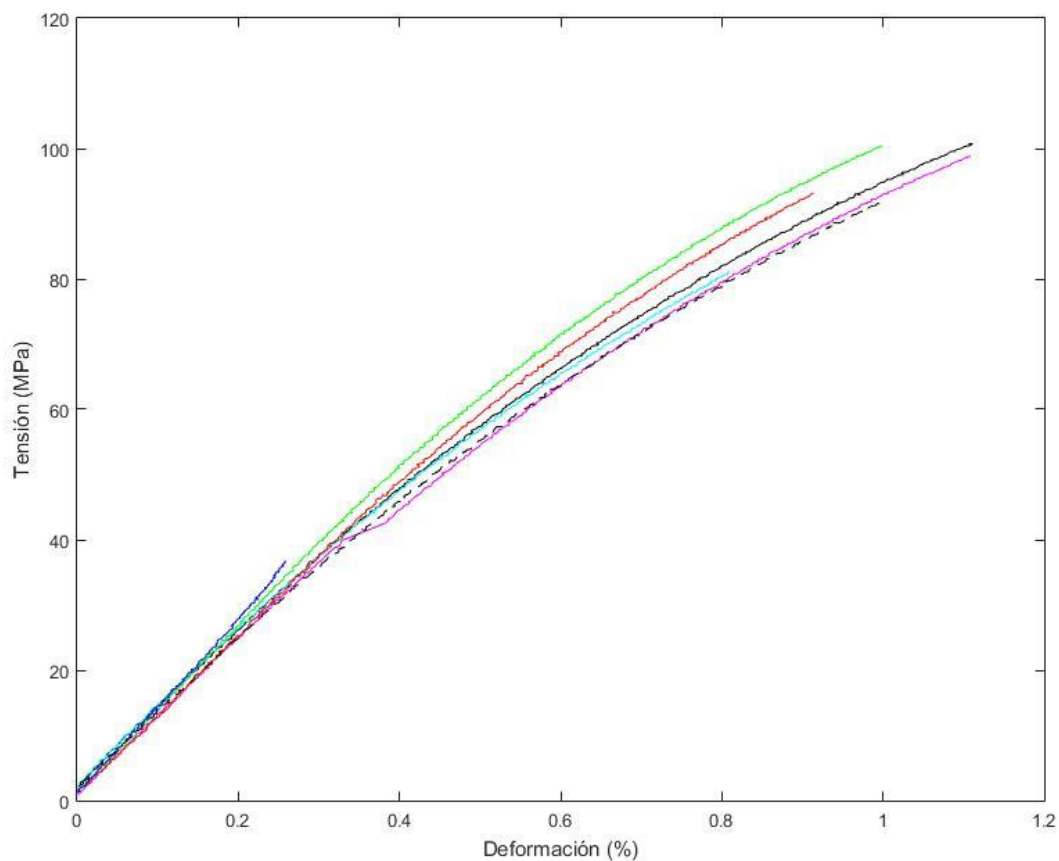


Figura 4-4 Curvas tensión-desplazamiento a 45°

Nº Probeta	Área	Carga última (N)	Resistencia a tracción (Mpa)	desplazamiento max (mm)	Deformación max (%)
1	17,52	1764,80	100,71	0,55	1,11
2	16,79	1658,90	98,81	0,55	1,11
3	17,45	1416,60	81,17	0,40	0,81
4	16,97	1580,40	93,14	0,46	0,91
5	17,08	1714,80	100,39	0,50	1,00
6	17,58	645,20	36,70	0,13	0,26
7	16,94	1556,80	91,87	0,50	1,00
Media	17,19	1476,79	86,11	0,44	0,88
Desviación Típica	0,32	384,07	22,83	0,15	0,30

Tabla 4-3 Resultados probetas a 45°.

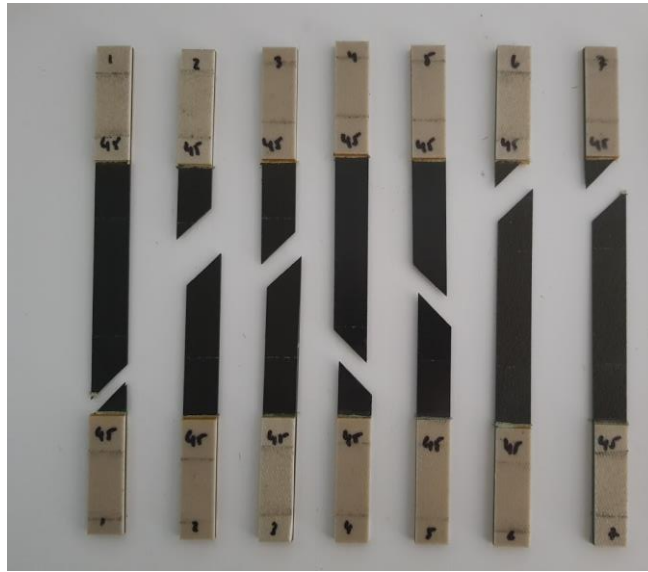


Figura 4-5 Probetas a 45° después de ensayo.

Para esta serie de probetas, como se puede observar en los resultados numéricos, se tuvo una rotura prematura en la probeta número 6. La causa de esta rotura se pudo contemplar en la Figura 4-5, viéndose que esta probeta tuvo una rotura dentro del taco, siendo este taco el causante de dicha rotura prematura.

Una vez descartada esta probeta, ya podemos calcular los parámetros del material para esta orientación,  $E_x$  y  $G_{12}$  (Tabla 4-4). En la figura 4-6 se pueden observar las curvas tensión-deformación una vez descartada la probeta no válida.

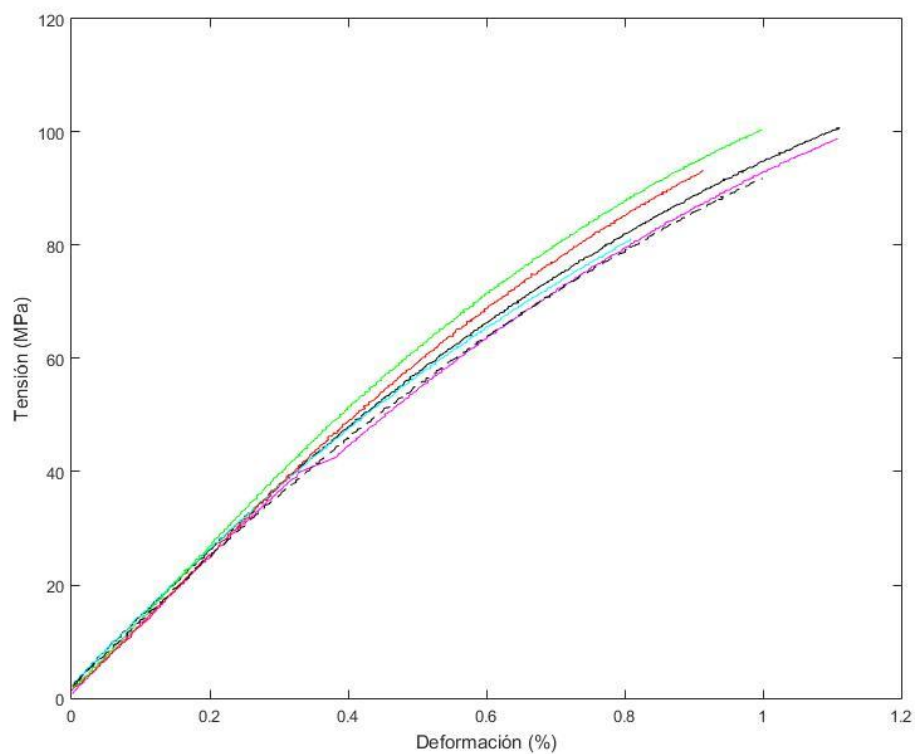


Figura 4-6 Curvas tensión-desplazamiento válidas a 45°

Nº Probeta	Ex (MPa)	G12 (MPa)	Exsec (MPa)	G12sec (MPa)
1	11250,00	4367,50	9106,09	3198,21
2	11640,00	4607,22	8912,66	3103,59
3	12572,44	5220,18	10028,45	3672,78
4	11750,00	4676,53	10203,53	3767,48
5	12025,60	4853,62	10052,71	3685,81
7	11120,00	4289,63	9200,36	3244,92
Media	11726,34	4669,11	9583,97	3445,47
Desviación Típica	530,66	339,58	570,49	293,72

Tabla 4-4 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 45°.

### 4.3. Orientación de 60°

Se muestran a continuación los resultados de los ensayos para las probetas de 60°.

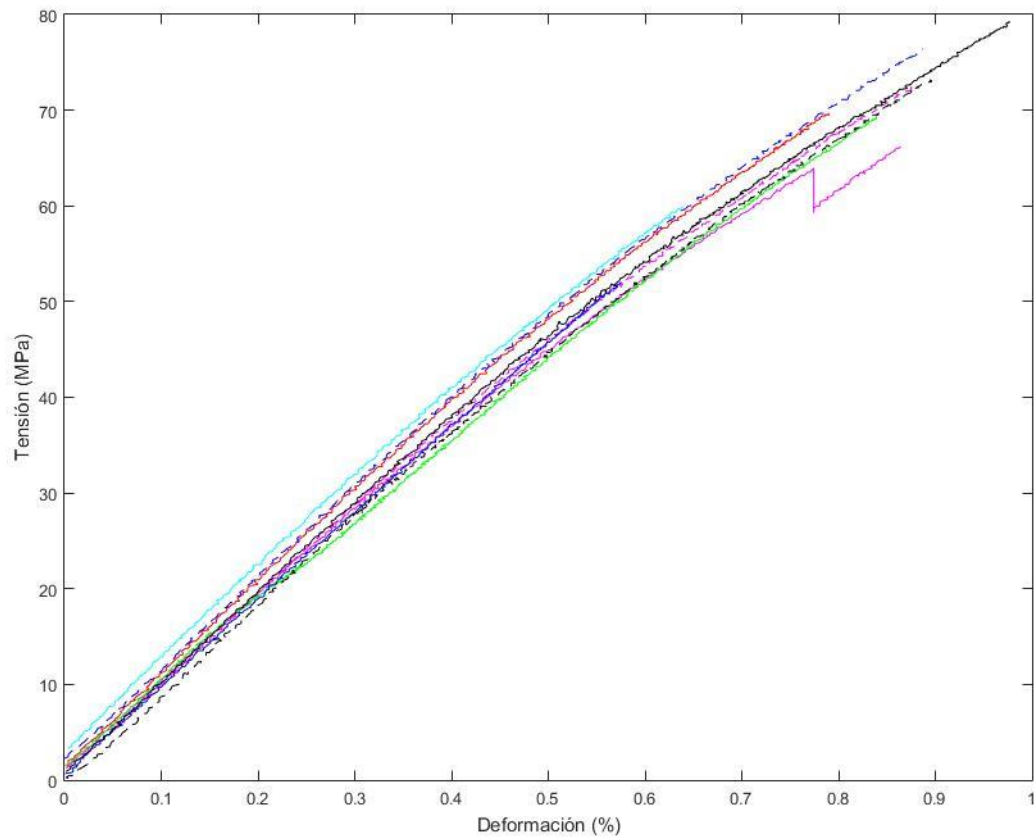


Figura 4-7 Curvas tensión-desplazamiento para 60°

Nº Probeta	Área	Carga última (N)	Resistencia a tracción (Mpa)	desplazamiento max (mm)	Deformación max (%)
1	17,89	1295,90	72,45	0,44	0,88
2	18,70	1238,00	66,19	0,43	0,86
3	17,53	1050,70	59,94	0,32	0,64
4	17,61	1227,20	69,68	0,39	0,79
5	17,11	1188,00	69,42	0,42	0,84
6	17,32	900,70	52,00	0,29	0,57
7	17,43	1332,20	76,42	0,44	0,89
8	17,52	1388,10	79,24	0,49	0,98
9	17,39	1272,40	73,19	0,45	0,89
Media	17,61	1210,36	68,73	0,41	0,82
Desviación Típica	0,46	150,22	8,43	0,06	0,13

Tabla 4-5 Resultados probetas a 60°.



Figura 4-8 Probetas a 60° después de ensayo

De esta serie de probetas, la única con la que se tuvo problemas debido a una rotura prematura fue la número 6. Esta rotura debió deberse a algún fallo en la fabricación o defecto interno del material dado que sufrió una rotura no muy cerca del taco, por lo que podemos descartar el efecto de dicho taco como causa de la rotura. Se muestra en la Figura 4-9 los resultados una vez descartada la probeta 6.

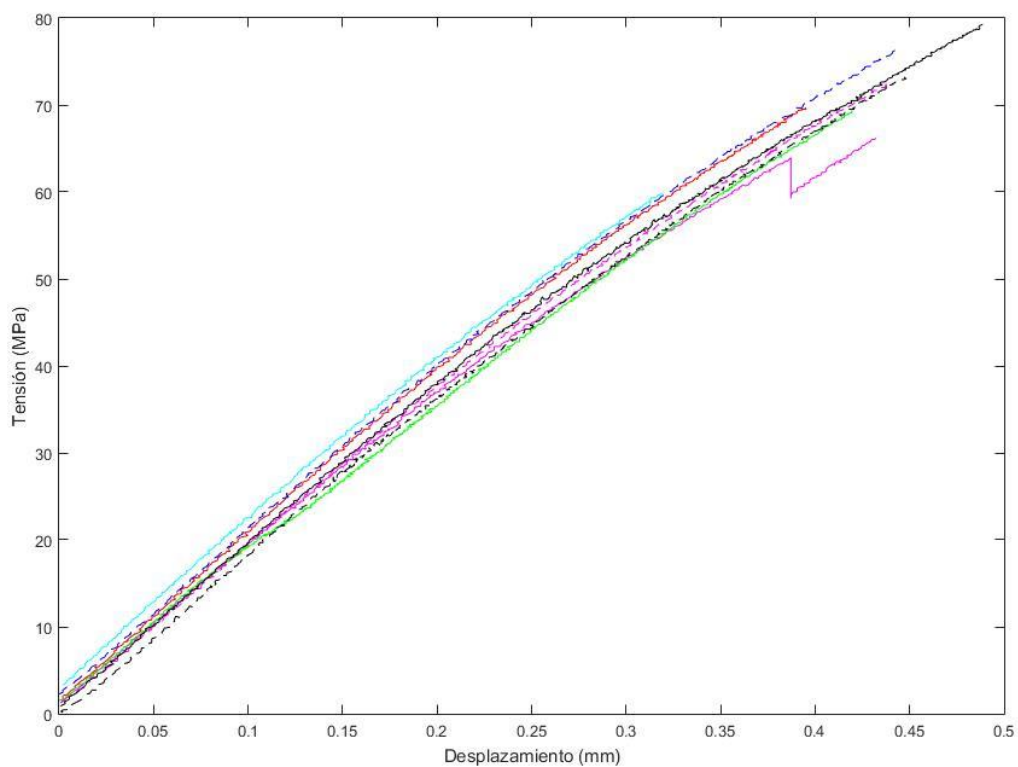


Figura 4-9 Curvas tensión-desplazamiento válidas a 60°.

Solo queda calcular las propiedades del material ya conocidos los resultados de las probetas, Tabla 4-6.

Nº Probeta	Ex (MPa)	G12 (MPa)	EXsec (MPa)	G12sec (MPa)
1	8882,79	4303,75	8278,63	3620,93
2	9365,48	4964,99	7659,41	3046,42
3	9349,57	4941,22	9380,55	4987,64
4	9600,62	5334,40	8829,16	4237,26
5	9000,11	4453,79	8274,63	3616,85
7	9297,52	4864,45	8613,18	3981,69
8	9457,25	5105,05	8109,28	3452,74
9	8582,89	3947,35	8186,32	3528,13
Media	9192,03	4739,38	8416,39	3808,96
Desviación Típica	339,50	461,94	520,72	593,06

Tabla 4-6 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 60°.

#### 4.4. Orientación a 75°.

En la Figura 4-10 se tienen las curvas tensión-deformación para las probetas con 75° de orientación. Se tienen también los resultados numéricos en la Tabla 4-7.

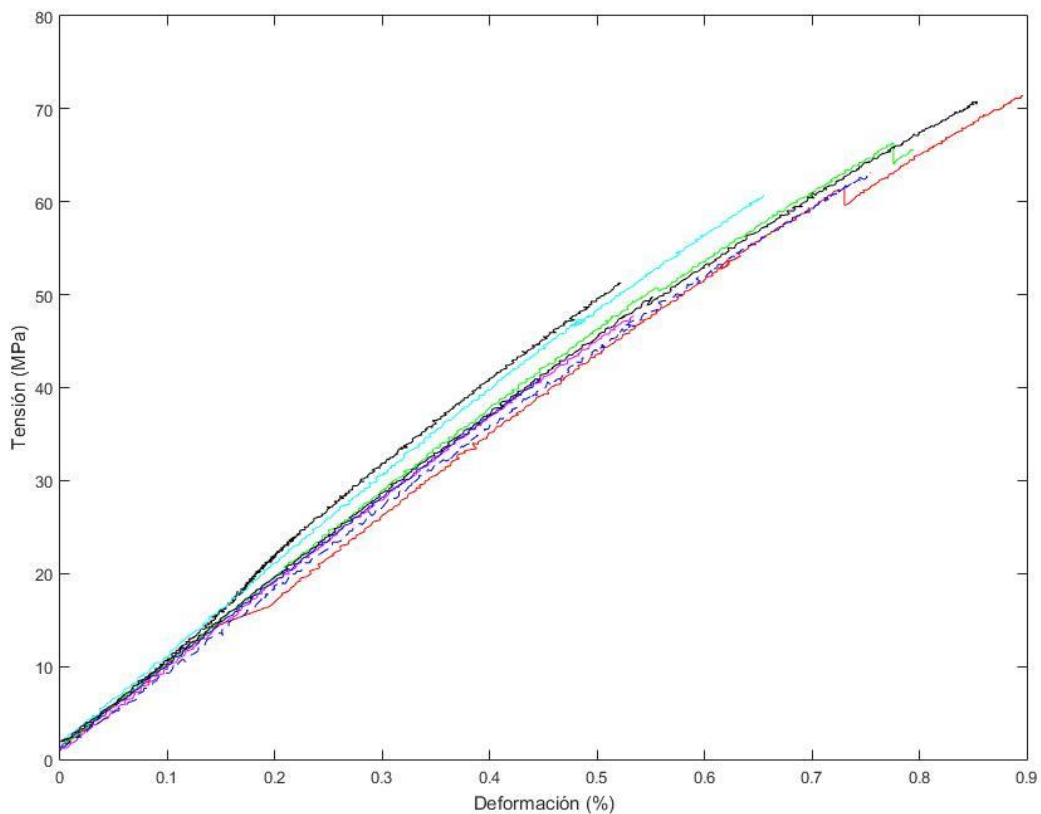


Figura 4-10 Curvas tensión-desplazamiento para 75°

Nº Probeta	Área	Carga última (N)	Resistencia a tracción (Mpa)	desplazamiento max (mm)	Deformación max (%)
1	17,26	884,90	51,26	0,26	0,52
2	17,44	832,20	47,72	0,27	0,53
3	17,43	1058,50	60,72	0,33	0,66
4	17,41	1242,90	71,41	0,45	0,90
5	17,18	1139,90	66,35	0,39	0,78
6	16,44	671,50	40,85	0,22	0,44
7	17,56	1108,50	63,12	0,38	0,75
8	17,19	1216,40	70,77	0,43	0,85
Media	17,24	1019,35	59,02	0,34	0,68
Desviación Típica	0,35	202,46	11,23	0,08	0,17

Tabla 4-7 . Resultados probetas a 75°



Figura 4-11 Probetas a 75° después de ensayo

En esta serie de probetas se tuvieron más problemas durante los ensayos, obteniéndose varias roturas prematuras, concretamente en las probetas, 1, 2 y 6. Estas roturas, como se puede ver en la Figura 4-11, se deben a la rotura dentro del taco de la probeta, a causa del efecto de este como concentrador de tensión en esa zona. Vamos a continuación, a mostrar ahora los resultados una vez descartados estas probetas.

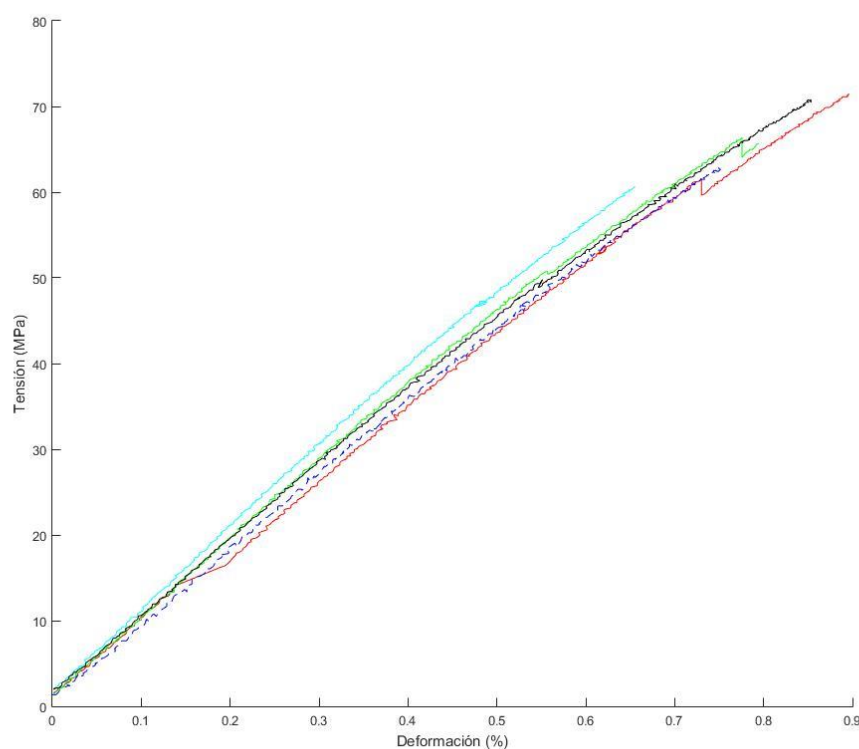


Figura 4-12 . Curvas tensión-desplazamiento válidas a 75°

Se procede con estos resultados, al calculo de las propiedades del material para la orientación de 75°, Tabla 4-8.

Nº Probeta	Ex (MPa)	G12 (MPa)	EXsec (MPa)	G12sec (MPa)
3	8841,45	10504,78	9269,95	86619,70
4	8825,50	10155,77	7977,05	3432,97
5	8817,00	9978,65	8552,12	6393,06
7	7997,33	3494,00	8366,96	5055,04
8	8647,50	7364,67	8316,47	4774,86
Media	8625,76	8299,58	8496,51	21255,13
Desviación Típica	360,00	2962,06	479,67	36555,03

Tabla 4-8 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 75°

Para estas orientaciones tan grandes, el cálculo de  $G_{12}$  no es viable, ya que se obtienen unos resultados muy dispares, debido a que, para estos ángulos tan cercanos a 90°, el modo que hemos calculado  $G_{12}$  es muy sensible a pequeñas variaciones en  $E_x$ . Es por esto, que el mejor resultado de  $G_{12}$  se obtiene de ensayar probetas a 45°.



## 4.5. Orientación a 90°.

Por ultimo, tenemos la serie de probetas a 90°, pudiendo observar sus curvas tension-deformación en la Figura 4-13.

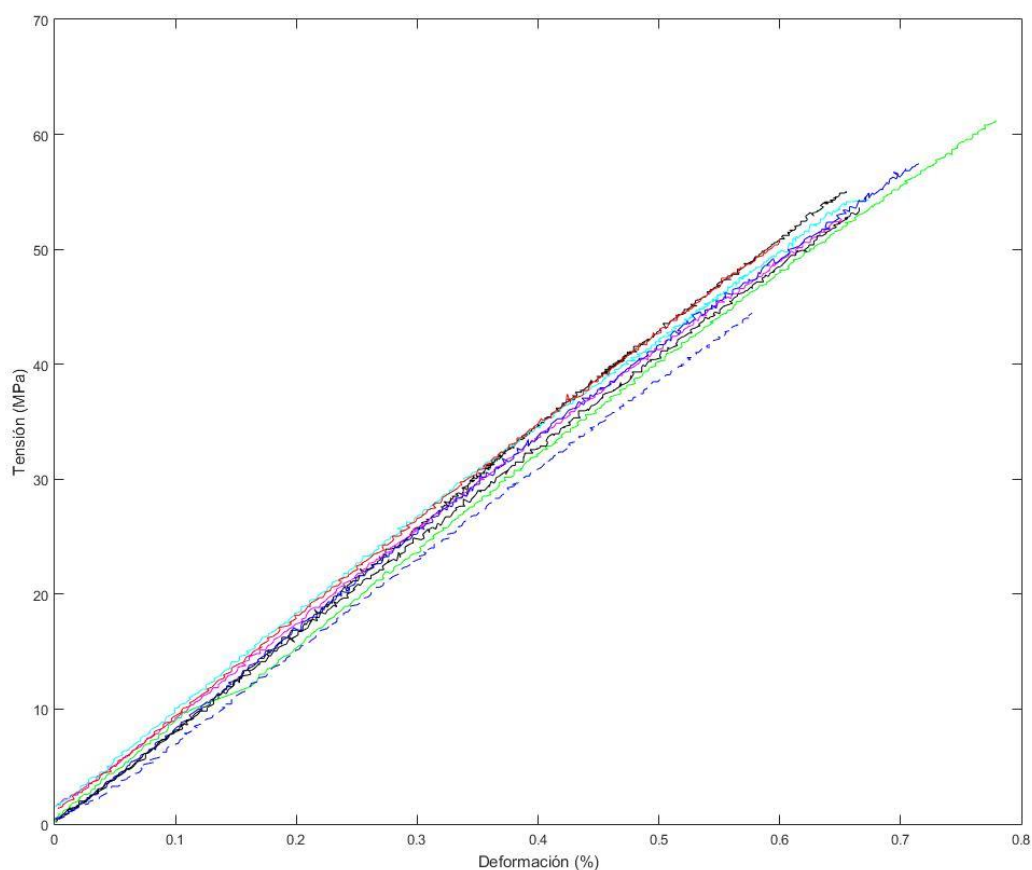


Figura 4-13 Curvas tensión-desplazamiento para 90°

Nº Probeta	Área	Carga última (N)	Resistencia a tracción (Mpa)	desplazamiento max (mm)	Deformación max (%)
1	17,18	945,40	55,04	0,33	0,66
2	17,75	934,90	52,68	0,33	0,65
3	17,51	950,70	54,29	0,34	0,67
4	17,25	876,90	50,85	0,30	0,60
5	17,37	1064,40	61,26	0,39	0,78
6	17,65	784,80	44,46	0,29	0,58
7	17,55	1008,50	57,46	0,36	0,72
8	17,14	919,10	53,62	0,33	0,67
Media	17,43	935,59	53,71	0,33	0,66
Desviación Típica	0,23	83,40	4,90	0,03	0,06

Tabla 4-9 Resultados probetas a 90°



Figura 4-14 Probetas a 90° despues de ensayo

De esta serie de probetas, solo la probeta número 6 arrojó unos resultados muy inferiores al resto. Suponemos que esto se debe a la rotura de dicha probeta dentro del taco, como se puede observar en la Figura 4-14. La numero 4 también rompió muy cerca del taco, pero justo fuera de él, y arrojó unos resultados, que aunque algo inferiores al resto, podremos considerar válidos.

En la Figura 4-15 se tienen de nuevo las curvas tensión-deformación excluyendo esta vez la probeta número 6.

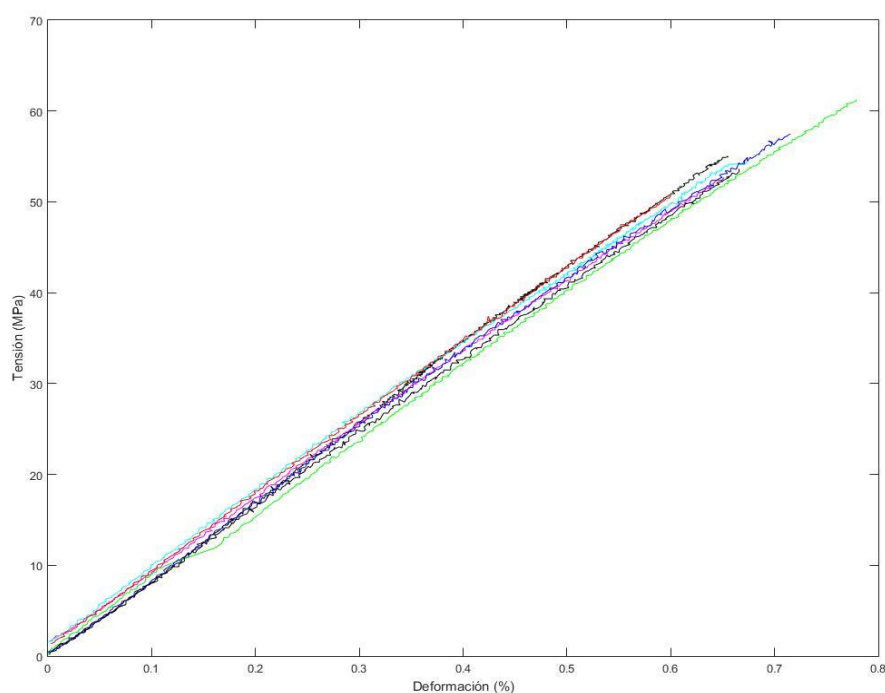


Figura 4-15 Curvas tensión-desplazamiento válidas a 90°

Con los resultados de las probetas válidas, ya podemos proceder al cálculo de las propiedades del material para esta orientación de 90°.

Nº Probeta	E22 (MPa)	G12 (MPa)	E22sec (MPa)	G12sec (MPa)
1	7973,40	0	8403,54	0
2	7418,10	0	8091,97	0
3	8359,67	0	8057,43	0
4	8823,22	0	8474,53	0
5	8927,33	0	7868,25	0
7	7998,44	0	8031,34	0
8	7228,00	0	8053,70	0
Media	8104,02	0	8140,11	0
Desviación Típica	648,92	0	217,41	0

Tabla 4-10 Valores Módulo de Elasticidad y Resistencia a Cortadura probetas a 90°.

Los valores de  $G_{12}$  y  $G_{12sec}$  no tienen sentido para esta orientación, de ahí que su valor sea 0.

## 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

---

**E**n este capítulo se hará un recopilatorio de todo lo visto durante el desarrollo del proyecto, tanto de la parte de fabricación de las probetas de material compuesto, como del ensayo y posterior procesamiento de los datos de estos.

### 5.1. Fabricación

Resumiendo el Capítulo 3 donde se detalló el proceso de fabricación, hemos tenido que fabricar una serie de probetas para su posterior ensayo a tracción a partir de un laminado de fibra de carbono y matriz epóxica.

Durante todo el proceso nos hemos encontrado con una serie de dificultades a la hora de la fabricación de las probetas.

Desde el primer momento, ha sido necesario tener gran cuidado con las condiciones en las que se trabajaba con el material, evitando tanto el contacto de este con impurezas como intentando mantenerlo en todo momento dentro de las temperaturas adecuadas para su manipulación, recordemos, que era necesario su almacenaje a  $-18^{\circ}\text{C}$  y su manipulación a una temperatura no superior a  $24^{\circ}$ . Por todo ello hacíamos uso de la sala limpia para el corte y apilado del material.

Con respecto al corte del material, al venir este en formato de cinta (15cm de ancho) en sentido de la fibra, fue necesario, dado que buscábamos fabricar los laminados con unas medidas de 15x20cm, cortar el material de una manera especial con el fin de conseguir que, en dichas mediadas, tuviésemos la orientación de la fibra deseada.

Con respecto a la apilación del material, las únicas precauciones a tener en cuenta fueron las de realizarlo consiguiendo la orientación correcta, y con cuidado de no contaminar el material, evitando que se introdujesen impurezas entre las distintas capas, lo que reduciría las propiedades del laminado. Estas impurezas en su interior harían de concentradores de tensión que podrían provocar una rotura del material a una carga inferior a la que realmente podría soportar si no existiesen dichas impurezas. Aunque se procure reducir las imperfecciones y partículas al mínimo, siempre existirán dentro del material, y es por ello, que, a la hora de un uso real del material, se usen márgenes de seguridad a la hora del cálculo de la resistencia.

Una vez con los laminados apilados, se procedió a la creación de la bolsa de vacío dentro de la cual se introduciría el material en el autoclave para su curado. Esta bolsa de vacío era primordial que fuese perfectamente estanca, ya que debía asegurar el vacío en su interior durante el proceso dentro del autoclave.

Durante el proceso de curado, punto crucial en la fabricación del material, ya que es durante el cual este gana sus propiedades finales, se aseguró en todo momento que la temperatura y presión fuesen las

adecuadas. En el proceso de fabricación de las probetas de este proyecto se tuvo un percance con el autoclave, debido a que este sufrió una avería durante el proceso de curado, dejando de calentar. Por suerte, ya se encontraba en la parte final del ciclo de curado de nuestro laminado, y la curva de enfriado que sufrió el autoclave entraba dentro de los límites marcados por nuestro ciclo de curado, obteniendo por tanto, unas probetas curadas correctamente.

Por último, solo quedaba la colocación de los tacos de vidrio y el corte de los laminados para obtener las probetas finales.

Aunque a priori no parezca un proceso que conlleve dificultad en el proceso de fabricación, es muy importante el proceso de corte final de las probetas. Esto es así debido a que, como estas tienen un tamaño muy reducido, solo 15mm de ancho, cualquier desviación de la hoja de corte durante el proceso podría estropear una probeta, como podemos ver en la Figura 5-1.



Figura 5-1 Probeta estropeada durante el proceso de corte

Del apartado de fabricación, concluir que, aunque el material compuesto aporte enormes ventajas frente a los materiales compuestos en términos de resistencia/peso, decir que también su fabricación es un proceso más complejo y costoso, por lo que, dependiendo de la aplicación, puede no merecer la pena su uso si los requisitos de peso no son una prioridad. En el mundo de la aeronáutica, sin embargo, el peso es un factor fundamental, y de ahí que el uso de materiales compuestos esté ganando mucho terreno,

## 5.2. Ensayos.

Ya mostrados los resultados para todas las probetas en el capítulo anterior, vamos a proceder a resumir estos datos y a mostrar como varían las características del material en función del ángulo de la fibra en las probetas que es el objetivo principal de este proyecto.

En la figura 5-2, se tiene un gráfico que recoge la media de los valores límites tanto de tensión como de deformación para cada ángulo de fibra.

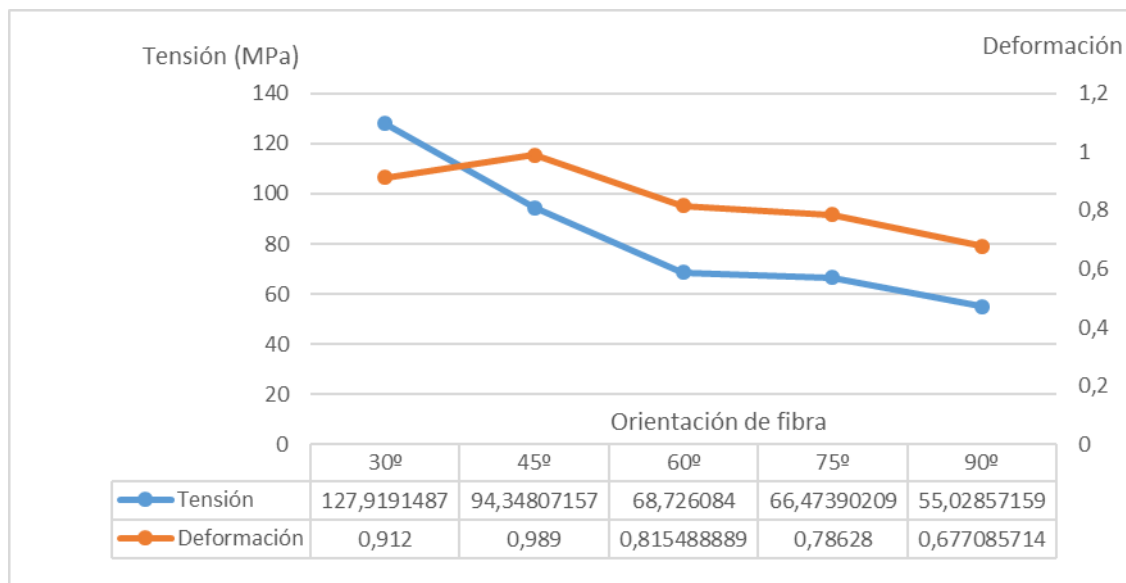


Figura 5-2 Tensión y deformación en función de la orientación de la fibra

Con respecto a la tensión máxima que soporta el material, se observa la tendencia decreciente conforme la orientación de la fibra va en aumento hasta alcanzar los 90°. La explicación a esto la encontramos en lo que ya se explicó en el apartado 2 de este proyecto, en la ortotropía de los materiales compuestos. Básicamente se debe al hecho de que, a mayor diferencia entre orientación de fibra y dirección de aplicación de la carga, menos entra en juego la resistencia a la tracción de las fibras, que son las que realmente aportan dicha resistencia al material. La matriz, cuya principal función es la de aportar rigidez al material, manteniendo en su sitio a las fibras, así como proteger de agentes externos a estas, tiene muy poca resistencia a tracción, por lo que, a grandes orientaciones de la fibra, dónde es la matriz la que debe resistir las cargas, se obtienen peores resultados en cuanto a resistencia. De ahí esa tendencia a disminuir la tensión que es capaz de soportar el material conforme aumentamos la orientación.

Esta gráfica es muy interesante observarla junto a la obtenida para ángulos de fibra de entre 0-30°, teniendo reunidos por tanto los resultados de 0° hasta 90° (Figura 5-3) con el fin de tener una visión completa del comportamiento del material.

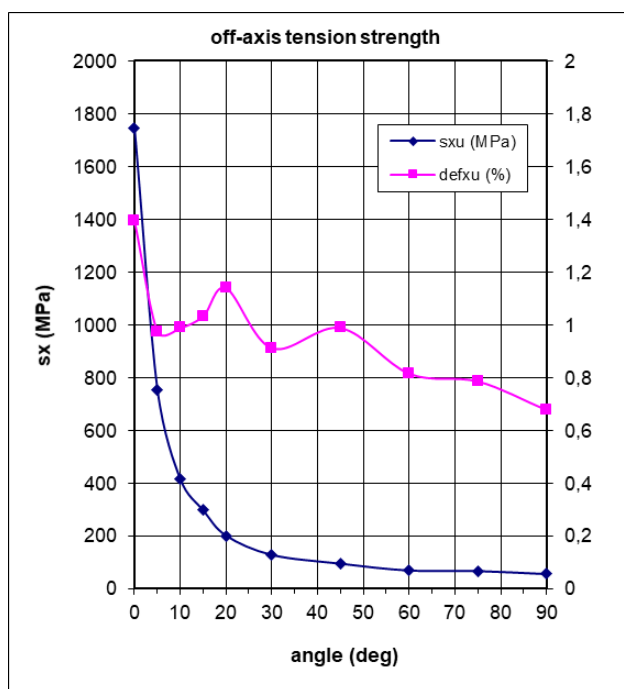


Figura 5-3 Tensión y deformación para orientaciones de 0-90°

Se observa, respecto a la tensión de rotura, la continua tendencia descendente, aunque con una pendiente casi nula para las orientaciones mayores de 40°, ya que como se ha comentado, en estas orientaciones, prácticamente el único trabajo es realizado por la matriz, dejano por tanto de depender la resistencia de la orientación de las fibras, al ser muy reducido el aporte de estas a la resistencia.

En cuanto a la curva de deformación para el caso estudiado en este proyecto, entre 30 y 90°, observamos que exceptuando los resultados obtenidos para una orientación de 45° donde la deformación máxima sufre un aumento, la curva tiene una pendiente descendente. El hecho de que las probetas de 45° tengan una mayor deformación a rotura que las de 30°, no refleja el comportamiento real del material. Realmente la deformación va en disminución desde los 30° hasta los 90°.

Esta anomalía se debe a la gran distorsión en los resultados de deformación para las orientaciones de 30 y 45°, como se puede observar en la Figura 5-4. Para probetas que rompen aproximadamente a la misma tensión, puede haber una gran diferencia en la deformación a la que rompen. Este efecto podríamos reducirlo considerando como valores finales de rotura y deformación, el momento en el cual se producen las primeras roturas de fibras en el material, donde se observaría ahora que los resultados de deformación tendrían el compartamiento antes mencionado.

Es interesante también el poder observar en un mismo gráfico las curvas tensión-deformación de todas las probetas ensayadas, para poder tener una visual de las tendencias en el comportamiento del material conforme variamos el ángulo de las fibras. En la Figura 5-4 tenemos dicha recopilación, agrupando por colores los resultados para las probetas con la misma orientación de la fibra.

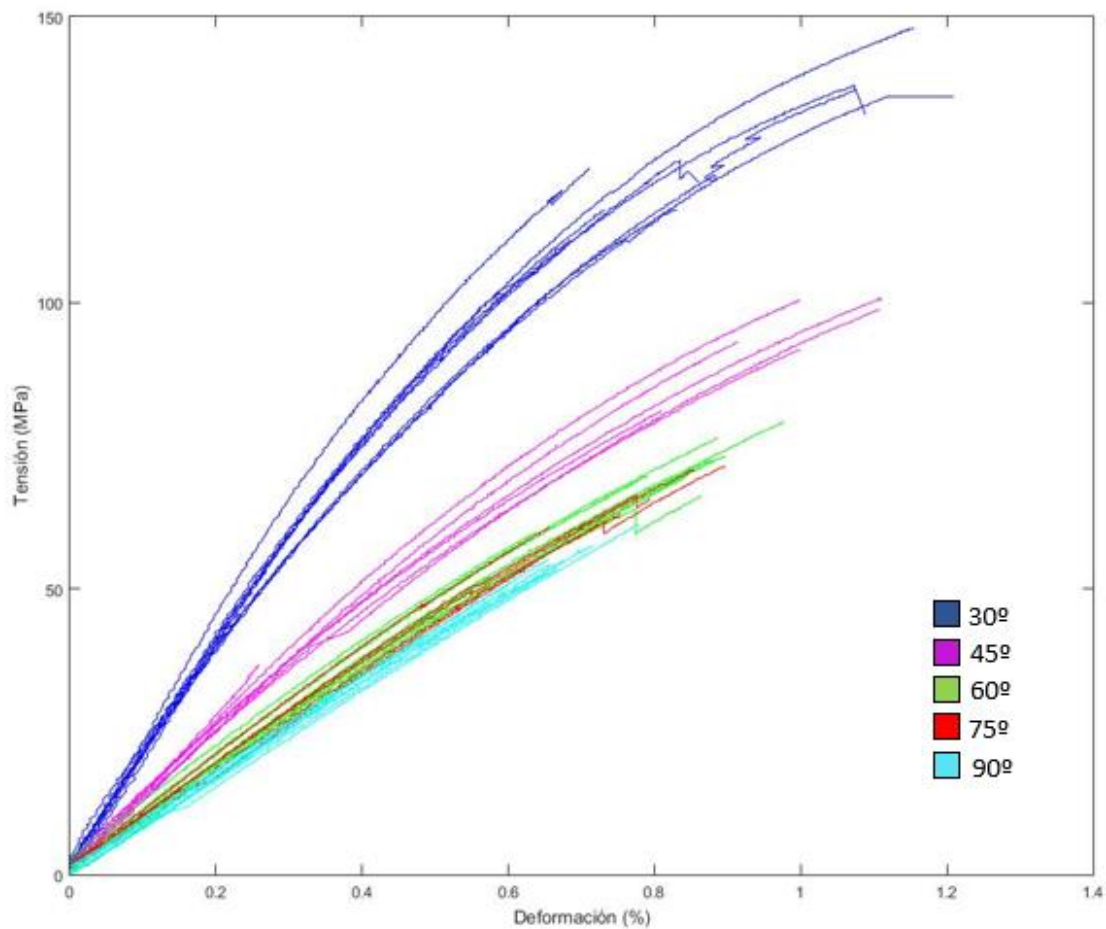


Figura 5-4 Curvas tensión-deformación por ángulos de fibra.

A simple vista, se observa directamente la pérdida de inclinación de las curvas, o lo que es lo mismo el  $E_x$  conforme va aumentando el ángulo de la fibra. Sin embargo, conforme mayores son dichos ángulos, menores son las diferencias, observándose que, para las curvas de 60, 75 y 90°, la diferencia en la inclinación es mínima.

Para estas tres orientaciones se observa también que las curvas pierden curvatura, siendo cada vez más rectas. Esto se debe a que para estas orientaciones, lo que principalmente está trabajando para soportar la tracción es la matriz, mientras que en ángulos menores, es la fibra la que predomina sobre la matriz, lo que en la Figura 5-4 se observa al tener estos ángulos una mayor resistencia, y una curvatura en sus curvas.

También es observable en la Figura 5-4, la reducción en los valores de tensión y deformación que se tiene conforme se va aumentando la inclinación de la fibra.



Con estos resultados de tensión y deformación ya fue posible calcular las propiedades buscadas del material, es decir,  $E_x$  y  $G_{12}$  para las orientaciones entre 30 y 75° y  $E_{22}$  para la orientación de 90°. En la tabla 5-1 se tiene un resumen de estos resultados en función de la orientación de la fibra.

Orientación	$E_x$ (MPa)	$G_{12}$ (MPa)	$E_{xsec}$ (MPa)	$G_{12sec}$ (MPa)
30°	19084,49	4564,40	14348,23	3222,33
45°	11726,34	4669,11	9583,97	3445,47
60°	9192,03	4739,38	8416,39	3808,96
75°	8625,76	8299,58	8496,51	21255,13
90°	8104,02	0	8140,11	0

Tabla 5-1 Propiedades del material en función del ángulo de fibra.

Observando el compartamiento de  $E_x$  se ve como tiene un compartamiento decreciente conforme se aumenta la orientación de la fibra, siendo la pendiente más acusada para los menores ángulos de orientación de las fibras, Figura 5-5.

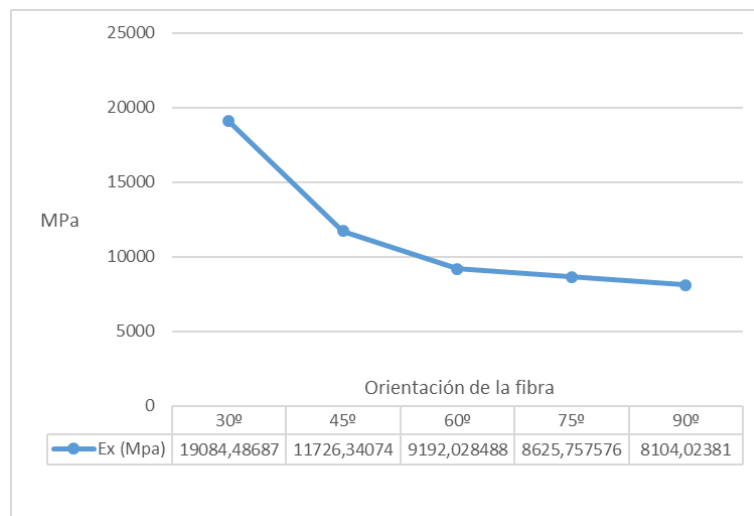


Figura 5-5  $E_x$  en función de la orientación de la fibra.

Con respecto al módulo de elasticidad transversal, el  $G_{12}$ , se observa un valor constante para valores de orientación entre 30° y 60°, mientras que para las orientaciones de 75 y 90°, los resultados que arroja no son significativos, bien porque para 75° el cálculo de  $G_{12}$  no es viable, bien porque no tiene sentido su cálculo para 90°.

El fabricante aporta un valor de  $G_{12}$  de 4.75 GPa para una orientación de 45° de la fibra, que como podemos ver en la Figura 5-6 concuerda completamente con los datos obtenidos en nuestros ensayos.

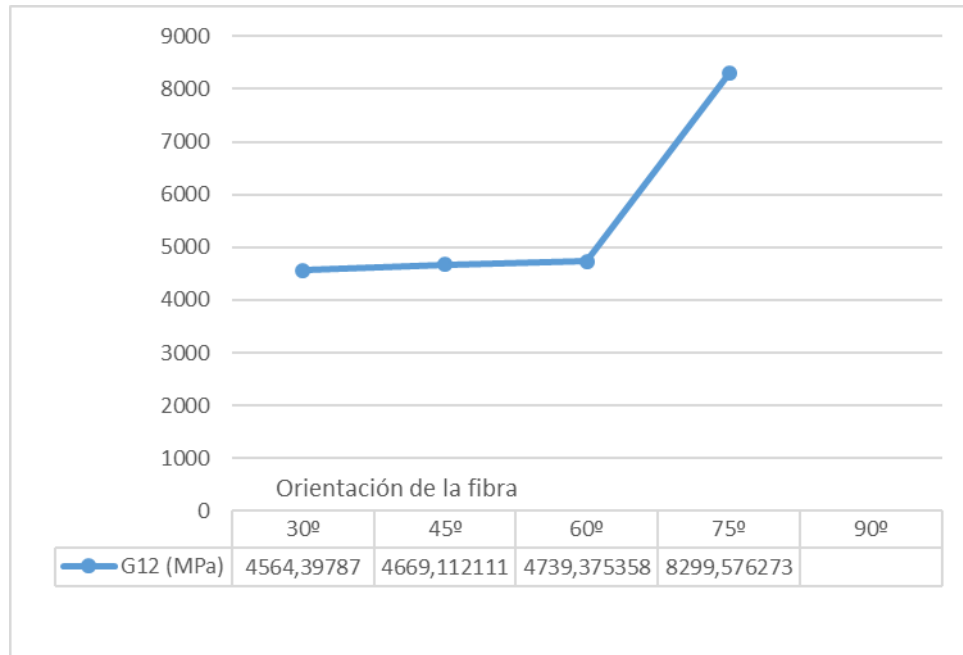


Figura 5-6  $G_{12}$  en función de la orientación de la fibra.

Como comentario final, decir que en una aplicación real de este tipo de material, nunca se usaría un laminado unidireccional, ya que, durante la vida operativa de cualquier pieza aeronáutica, u otra pieza de cualquier otro ámbito que use este material, esta se ve sometida a cargas que no son unidireccionales, y como hemos visto a lo largo de este proyecto, si la dirección de la carga aplicada difiere mucho de la dirección de la fibra, el material ve reducido en gran medida su resistencia.

## 6 DESARROLLOS FUTUROS

A partir de los resultados que se han obtenido en este proyecto, se han abierto nuevos caminos que sería interesante estudiar con el fin de ampliar los conocimientos aquí adquiridos.

Dentro de las probetas con el mismo ángulo de fibra, se observan dispersiones en los resultados, Las dispersiones en los resultados es algo inevitable, pero dentro de nuestras posibilidades, es recomendable reducirlas al mínimo, con el fin de obtener unos resultados más precisos. Estas dispersiones vemos que son mayores para ángulos menores de orientación de la fibra (Figura 6-1).

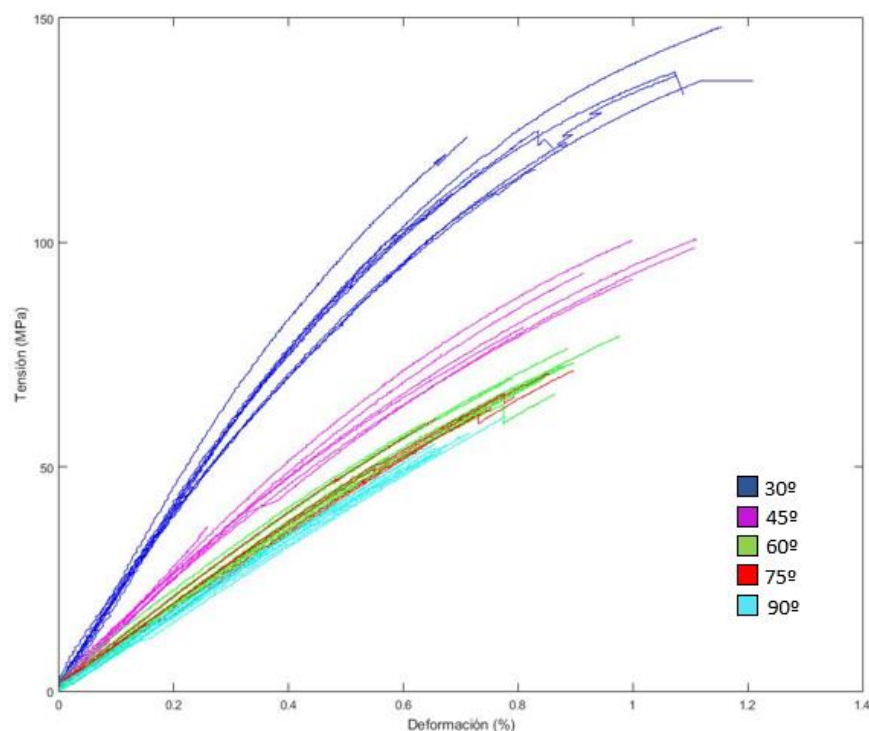


Figura 6-1 Curvas tensión-deformación por ángulos

Sería por tanto interesante estudiar el porque esta dispersión es mayor en ángulos de 30-45° que entre ángulos de 60-90°.

Para ello podemos abrir dos vías de investigación.

- Aumentar el ratio de las probetas. En este proyecto se ha usado un ratio de aproximadamente 14, es decir,  $\frac{\text{Largo de la probeta}}{\text{Ancho de la probeta}} \approx 14$ . Se podría estudiar los resultados obtenidos para un ratio mayor, en torno a 30.



Figura 6-2 Ratios de probetas

- Para pequeños ángulos en la dirección de la fibra, es necesario la colocación del taco en la dirección de esta. Esto no es necesario para las orientaciones de fibra que se han trabajado en este proyecto. Sin embargo, sería interesante ver como afecta el uso de taco normal y de taco oblicuo para estas orientaciones con gran dispersión.

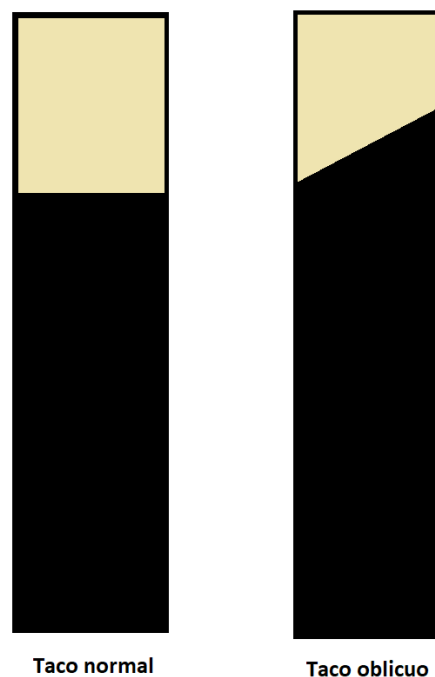


Figura 6-3 Diferente colocación del taco en la probeta.

Este proyecto ha sido complementario a otro donde se han estudiado las orientaciones de entre 0 y 30°. Sería por tanto muy interesante el estudio de ambos trabajos en conjunto, con el fin de obtener una visión global y total del comportamiento del material en función del ángulo de fibra.



# REFERENCIAS

---

[1] Introducción al análisis y diseño de materiales compuestos. Autores: F.paris, J.Cañas, J.C. Marín.

[1] Autor, «Este es el ejemplo de una cita,» *Tesis Doctoral*, vol. 2, nº 13, 2012.

[2] O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.

[4] [http://fabacademy.org/archives/2013/students/perezdelama.jose/11\\_composites\\_jpl.html](http://fabacademy.org/archives/2013/students/perezdelama.jose/11_composites_jpl.html)

[5] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

[6] Prácticas de materiales compuestos, 2014, J.Justo, J.C.Marín y J.Cañas.

[7] <https://es.wikipedia.org/wiki/Autoclave>

[8] IPS05-01-001-03 Carbon fibre Reinforced Epoxy Prepeg, Published and distributed by: AIRBUS S.A.S, Enero 2016.

